

## DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Miroslava Turkaodbor strojírenská technologie

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Studium tepelně-fyzikálních vlastností sádrových formovacích směsí pro výrobu speciálních tenkostěnných a hladkých odlitků ze slitin hliníku

## Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se se způsoby zjišťování tepelně-fyzikálních vlastností materiálů podle ČSN a s metodami zjišťování těchto vlastností používanými na katedře fyziky.  
Věnujte se i teoretickému rozboru řešení těchto úloh z hlediska jejich významu pro danou technologii.
- 2) Stanovte závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$ , specifického tepla  $c$ , a měrné hmotnosti  $\rho$  na teplotě pro různé sádrové formovací směsi. Z uvedených závislostí odvoďte závislost koeficientu tepelné akumulace směsi  $b_s$  na teplotě. Teplotní závislosti určete v rozmezí teplot 20-600 °C.  
Při přípravě vzorků ze sádrových směsí spolupracujte s diplomanty Podrazilem, Vodičkou, Kropáčem a Kopečkem.
- 3) Prostudujte metodu experimentálně početního stanovení koeficientu tepelné akumulace formy  $b_f$  vyvinuté na ústavu slévárenství a proveďte srovnání takto zjišťovaných hodnot  $b_f$  s hodnotami, které určíte z naměřených funkčních závislostí  $\lambda$ ,  $c$  a  $\rho$  na teplotě.  
Srovnání proveďte pouze pro několik hodnot  $b_f$  a  $b_s$  při odlévání AlSi10 (případně Tenzaloy).
- 4) Naměřené a vypočítané hodnoty sestavte do tabulek a graficky zpracujte. Z provedených zkoušek se pokuste stanovit optimální složení sádrových formovacích směsí z hlediska zkoumaných vlastností.

Autorské právo se řídí předpisy MŠK pro státní závěrečné zkoušky č. j. 51/72-32-III/2 ze dne 13. července 1972. Věstník MŠK, sešit 24 ze dne 31. 8. 1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC I, STUDENTSKÁ 5

V 37/72 S

+ příloha

Kozsah grafických laboratorních prací: tabulky, diagramy, fotografie

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran textu

Seznam odborné literatury:

- Kondratjev : Reguljarnyj teplovoj režim - Moskva 1952  
Kondratjev : Teplovyje izmerenija, Moskva 1962  
Kingery : Izmerenija pri vysokich temperaturach,  
Petržela : Slévárenské formovací látky, SNTL Praha 1955  
Doškář a kol.: Přesné lití do keramických forem  
Československé státní normy - třída 72.  
Neumann : DP-ST 724/69

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Bohumil Odstrčil

Konzultanti: Ing. Karel Daďourek CSc.  
Ing. Heinz Neumann

Datum zahájení diplomové práce: 18.10.1971.

Datum odevzdání diplomové práce: 7.7.1972.



*Václav Chaloupecký*  
Doc. Ing. Václav Chaloupecký CSc.  
vedoucí katedry

*F. Kotšmíd*  
Prof. Ing. Dr. techn. F. Kotšmíd  
děkan

v Liberci

dne 18.10.1971. 196

O B S A H

1. ÚVOD .....	4
2. OBECNÁ ČÁST .....	5
2.1. Základní poznatky o sádře .....	5
2.1.1. Pochody při tep. zpracování sádrovce .....	5
2.1.2. Druhy sádry .....	5
2.1.3. Tuhnutí a lití sádry .....	6
2.2. Měření tepelně-fyzikálních parametrů .....	7
2.2.1. Měření tepelné vodivosti .....	7
2.2.1.1. Metody stacionární .....	8
2.2.1.2. Metody nestacionární .....	9
2.2.2. Měření specifického tepla .....	10
2.2.2.1. Kalorimetrické hodnoty .....	10
2.2.2.2. Nestacionární metody .....	11
2.2.3. Měření objemové váhy .....	11
2.3. Metoda experimentálně početního stanovení koeficientu tepelné akumulace formy .....	11
2.3.1. Vejníkova metoda řešení tuhnutí odlitků ...	12
3. POPIS MĚŘENÍ TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ .....	15
3.1. Regulární režim .....	15
3.2. Popis měřicí aparatury a odvození výpočto- vých vzorců .....	19
3.3. Ověření přesnosti měření .....	24
3.3.1. Ověření zjednodušujících předpokladů .....	24
3.3.2. Vliv navlhání sádry .....	27
3.3.3. Vliv degradace sádry .....	28
3.4. Měření dilatací sádrových vzorků .....	29
3.4.1. Popis měřicí aparatury .....	29
3.4.2. Výpočet objemové váhy .....	30

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studium tepelně-fyzikálních vlastností sádrových formovacích směsí pro výrobu speciálních tenkostěnných a hladkých odlitků ze slitin hliníku.

Miroslav Turek

4. METODIKA VÝROBY VZORKŮ .....	32
4.1. Sádrové směsi použité k výrobě zkušebních vzorků .....	32
4.2. Příprava sádrových směsí a odlití zkušeb- ních vzorků .....	32
4.3. Tepelné zpracování vzorků .....	33
4.4. Forma a tvar vzorků pro jednotlivá měření ...	33
4.4.1. Měření tepelné vodivosti .....	33
4.4.2. Měření specifického tepla .....	34
4.4.3. Měření dilatací .....	35
5. EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY .....	36
5.1. Měření tepelné vodivosti .....	36
5.2. Měření specifického tepla .....	39
5.3. Měření objemové váhy .....	40
5.4. Stanovení koeficientu tepelné akumulace formy .....	41
6. PŘÍMÉ URČENÍ KOEFICIENTU TEPELNÉ AKUMULACE FORMY .....	53
6.1. Experimentální uspořádání .....	53
6.1.1. Výroba sádrové formy .....	53
6.1.2. Vyhodnocování měření .....	54
6.2. Výsledky měření .....	56
7. ZÁVĚR PRÁCE .....	57
7.1. Porovnání koeficientů tepelné akumulace for- my $b_g$ a $b_f$ .....	57
7.2. Vyhodnocení sádrových směsí .....	58
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	59
9. SEZNAM PŘÍLOH .....	60

## 1. Ú V O D

Prudký rozvoj průmyslu v současné době vyvolává stále vyšší nároky na výrobky jednotlivých odvětví. V praxi požadujeme výrobky dokonalejší konstrukce, vyšší kvality a v neposlední řadě i levnější. Ve slévárenství to znamená vyrábět odlitky s kvalitnějším povrchem, vyšší rozměrovou přesností, lepšími mechanickými vlastnostmi a mnohdy se značně tenšími stěnami. Těmto požadavkům se běžně vyhovuje zpřesňováním výroby při odlévání do pískových forem, používáním keramických forem nebo litím do kokil.

Kvalitativní změnu však přináší používání netrvalých forem ze sádry a sádrových směsí. Tento způsob výroby odlitků umožňuje odlévat slitiny neželezných kovů při dosažení jakosti povrchu 1,6 až 3,2  $\mu\text{m}/8/$  při dosažení přesnosti 0,02 mm na délku 20 mm. Lze dosáhnout tloušťky stěny 1,5 mm. Vyjimečná kvalita takto získaných odlitků je však placena o něco vyšší cenou ve srovnání s odléváním do jiných typů forem. Jestliže však tento způsob umožní vyrábět odlitky tak, aby nevyžadovaly další třískové obrábění a s kvalitními vnitřními povrchy, může být výroba vysoce efektivní. V naší republice se dosud tohoto způsobu přípravy forem a odlévání neuzívá. Jedním z důvodů, proč technologie této výroby není dosud propracovaná, je to, že je k dispozici zatím málo poznatků o sádře samotné.

Důležité pro poznání sádry, jako slévárenského formovacího materiálu, je zejména zjištění jejích tepelně-fyzikálních vlastností, které výrazně ovlivňují tuhnutí a chlazení odlitků ve formách. Předložená práce se zabývá studiem tepelně-fyzikálních vlastností sádrových formovacích směsí pro výrobu speciálních tenkostěnných a hladkých odlitků ze slitin hliníku.

## 2. O B E C N Á Č Á S T

### 2.1. Základní poznatky o sádře.

#### 2.1.1. Pochody při tepelném zpracování sádrovce.

Na výrobu sádry se nejčastěji používá sádrovec, to je síran vápenatý  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , který se volně vyskytuje v přírodě. Na prášek rozemletý sádrovec ztrácí při pálení krystalickou vodu. V intervalu  $107 - 130^\circ\text{C}$  se mění na polohydrát podle rovnice  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O}$ . Polohydrát vzniká ve dvou modifikacích  $\alpha$  a  $\beta$ . Polohydrát  $\alpha$  vzniká odvodněním sádrovce v prostředí bohatém vodou, nejčastěji v autoklávu (1,2 atp - 6 hod). Dále se suší a mele v mlýnu. Je kompaktní krystalický a má zřetelně rozeznatelné obrysy krystalů. Modifikace  $\beta$  vzniká odvodněním ve vakuu za teploty cca  $105^\circ\text{C}$ . Je vločkovitý, obrysy krystalů u něho nejsou patrné ani při větším zvětšení. Má větší povrch, je energeticky méně stabilní a lehčeji rozpustný, protože má rozrušenější strukturu. Při dalším zvyšování teploty nad  $150^\circ\text{C}$  se odstraní všechna krystalická voda a polohydrát se mění na anhydrid - rozpustný síran vápenatý  $\text{CaSO}_4$ . Anhydrid  $\alpha\text{CaSO}_4$  - rozpustný, vzniká úplným odvodněním dvojhydrátu nebo polohydrátu  $\alpha\text{CaSO}_4$  ve vakuu při  $100^\circ\text{C}$  nebo za normálního tlaku při  $110^\circ\text{C}$ .

Anhydrid  $\beta\text{CaSO}_4$  - rozpustný - vzniká úplným odvodněním  $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ . Obě modifikace se nevyskytují samostatně, ale tvoří složky rychle tuhnoucí sádry. Anhydrid vytvořený při nízké teplotě (cca  $120^\circ\text{C}$ ) při vystavení vlhkosti přibírá vodu a změní se na polohydrát. Anhydrid vytvořený blízko  $500^\circ\text{C}$  bude absorbovat vodu mnohem pomaleji.

#### 2.1.2. Druhy sádry.

V praxi se používají různé druhy sáder, které se nejčastěji nazývají podle použití - na př.: formovací, mode-

VŠST Liberec - fakulta strojní	DIPLOMOVÁ PRÁCE 1972	DP - ST 948/72
Katedra technologie a nauky o materiálu		List 6

lářská, štukatérská a podobně. Hlavní rozdíl mezi nimi je dán zastoupením modifikace  $\alpha$  nebo  $\beta$  a přechodných polotovarů. Nejčastější dělení jednotlivých druhů sáder se však provádí podle rychlosti tvrdnutí na:

- a) sádru rychle tvrdnoucí
- b) sádru přepálenou
- c) sádru pomalu tuhnoucí

ad a) Sádry rychle tvrdnoucí dostávají převážně pálením sádrovce na  $130^{\circ}$  -  $180^{\circ}\text{C}$ . Je to v podstatě polohydrát  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , ve kterém převažuje  $\alpha$  modifikace. Obsahuje asi  $1/3$  rozpustného anhydridu, který způsobuje rychlé tuhnutí, protože se ve vodě rozpouští více než polohydrát. Do této skupiny patří sádry:

štukatérská  
modelovací  
alabastrová

ad b) Sádra přepálená vzniká pálením nad  $400^{\circ}\text{C}$ , kdy vzniká přirozený anhydrid. Tato sádra je nevhodná pro technické účely, protože se špatně slučuje s vodou.

ad c) Pomalu tuhnoucí sádra je v podstatě síran vápenatý s hydraulickými přísadami. Obchodně se nazývá:

stavební sádra  
podlahová sádra

Vyrábí se pálením nad  $800^{\circ}\text{C}$  (vlivem příměsí v sádrovci i na vyšší teploty)/7/.

I sádry stejného druhu se ale mohou dost podstatně lišit podle toho, který závod je vyrábí (jemnost mletí, technologie zpracování) a jakých se používá surovin.

### 2.1.3. Tuhnutí a lití sádry.

Tuhnutím rozumíme přechod z tekutého (kašovitého) stavu do stavu tuhého. Proces tuhnutí a tvrdnutí probíhá tak, že se rozpustný anhydrid  $\text{CaSO}_4$  mění rychle v polohydrát a ten dále v dvojhydrát. Následkem menší rozpustnosti dvoj-



hydrátu se tvoří přesycený roztok a z něho se ihned vylučuje nadbytek dvojhhydrátu v podobě krystalů. Po tomto vykrytalování zbývá jen jednoduše sycený roztok dvojhhydrátu, který rozpouští polohydrát. To se opakuje až všechn polohydrát přejde v dvojhhydrát /7/.

K manipulaci se sádrou musí být využíván interval při začátku tuhnutí. Je to interval, kdy ještě sádrová kaše neztrácí licí schopnost. Rychlé tuhnutí přináší při práci se sádrou velké nevýhody. Optimální doba tuhnutí sádrových směsí používaných pro výrobu forem má mít počátek mezi 7 - 10 minutami a konec mezi 15 - 20 minutami po odlití /5/.

Doba lití je časový interval mezi začátkem sypání sádry a dobou, kdy sádrová kaše ztrácí licí schopnost /4/.

## 2.2. Měření tepelně-fyzikálních parametrů.

Tepelně-fyzikální vlastnosti formovacích materiálů ve slévárenství se vyjadřují tzv. koeficientem tepelné akumulace formy  $b_f$ , který charakterizuje přestup tepla z odlitku do formy.

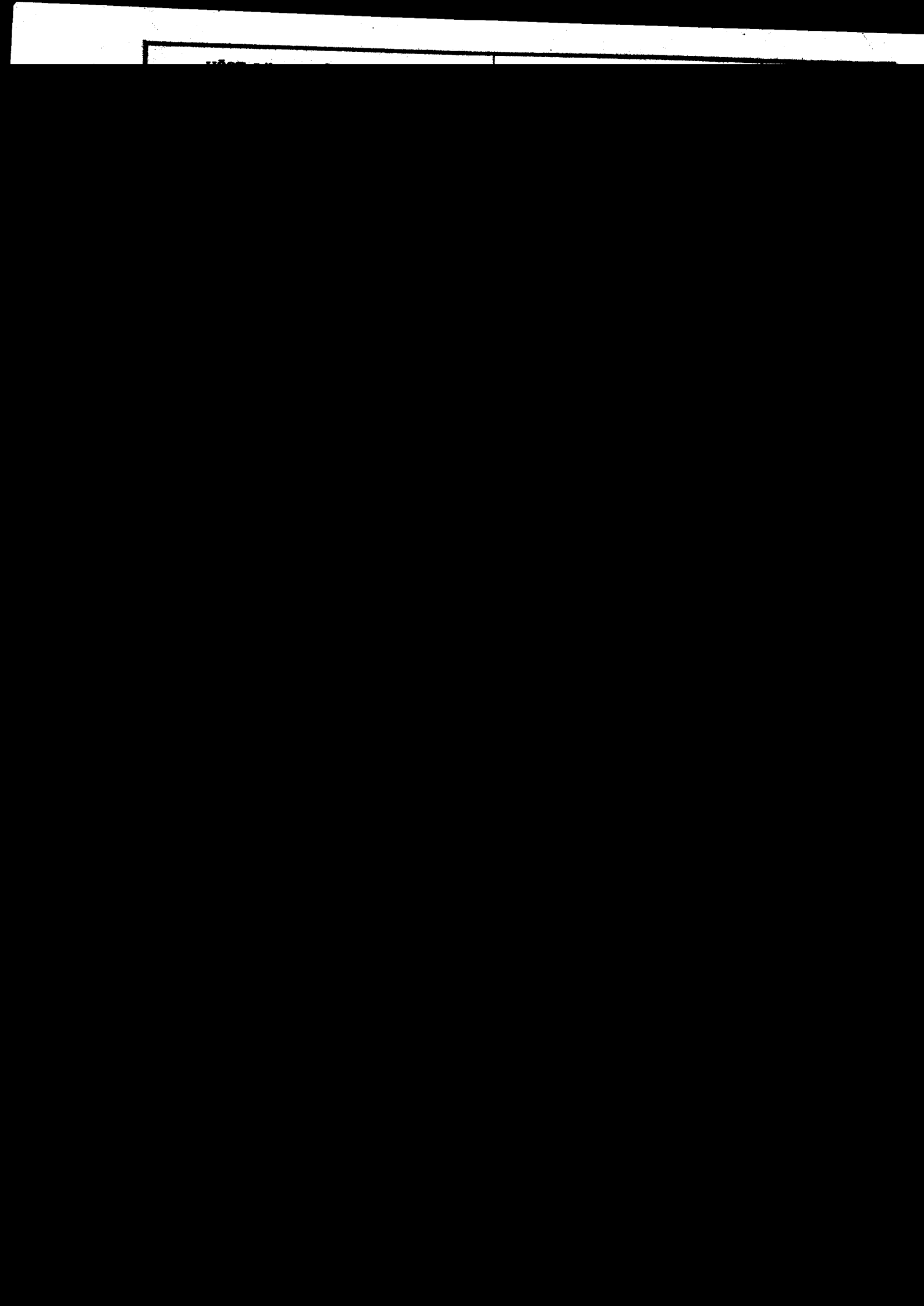
Vyjadřuje se vzorcem:

$$b_f = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma} \quad [\text{kcal/m}^2 \text{ hod } ^\circ\text{C}] \quad (1)$$

kde  $\lambda$  ..... tepelná vodivost materiálu formy  $[\text{kcal/m hod}^\circ\text{C}]$   
 $c$  ..... měrné teplo materiálu formy  $[\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}]$   
 $\gamma$  ..... objemová váha materiálu formy  $[\text{kg/m}^3]$

### 2.2.1. Měření tepelné vodivosti.

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  je dle /11/ definován jako množství tepla ve watech, které projde krychlí z uvažované hmoty o hraně 1 m mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl  $1^\circ\text{C}$ , jsou-li ostatní stěny krychle dokonale izolovány. Jednotkou je  $[\text{W/m}^\circ\text{C}]$ , v technické soustavě  $[\text{kcal/m.h}^\circ\text{C}]$ .



Zkušební metody pro stanovení tepelné vodivosti jsou v podstatě založeny na dvou principech:

- 1/ na ustáleném toku tepla (stacionární metody)
- 2/ na neustáleném toku tepla (nestacionární metody)

#### 2.2.1.1. Metody stacionární.

Všechny dále uvedené zkoušky jsou proveditelné pouze až po dosažení ustáleného tepelného stavu. To znamená, že měření jsou sice přesná, ale časově velmi náročná. Pro danou technologii, to jest měření tepelně-fyzikálních vlastností sádrových směsí, kdy jde vlastně o měření porovnávání, je tato časová náročnost nevýhodná. Jednotlivé metody jsou popsány jen orientačně, bližší informaci podává příslušná literatura.

##### a) Beckova metoda /16/:

Podstatou zkoušky je zjištění tepelné vodivosti rovinného vzorku výpočtem z hodnot jeho tloušťky, množství tepla přivedeného mezi jeho povrchy a rozdílu jejich teplot. Zkoušet lze materiály tuhé, sypké či vláknité, pokud lze vytvořit dostatečně tlustou rovinnou vrstvu.

Zkušební zařízení je poměrně složité, náročná je i příprava vzorku, jehož velikost musí být přispůsobena velikosti desek měřicího přístroje.

##### b) Nusseltova metoda /17/:

Podstatou zkoušky je zjištění tepelné vodivosti materiálů sformovaných do mezikulevé vrstvy výpočtem z hodnot jejich rozměrů, teplotního rozdílu vnějších povrchů obou koulí zkušebního zařízení a množství protačujícího tepla.

Zkouška je určena jen pro vláknité nebo sypké materiály.

##### c) Schmidtova metoda /14/:

Měření je založeno na metodě pomocné stěny, přičemž je tato pomocná stěna nahrazena ohřevným pásem, umožňujícím měření na stěnách rovných i zaoblených. Ohřevným pásem při-

loženým na izolované zařízení se určují tepelné ztráty. Ze zjištěných tepelných ztrát a na obou stranách izolace změřených teplot se vypočte tepelná vodivost.

Metoda je určena pro stanovení tepelné vodivosti izolovaných zařízení (potrubí) v provozu, kdy se předpokládá v měřeném potrubí dosažení setrvačného stavu.

d) další metody (/11/, /12/):

Tyto metody jsou v podstatě obdobou metod Nusseltovy a Bockovy. Měření jsou prováděna na stejném principu, rozdíl je pouze ve vlastnímkušebním zařízení.

#### 2.2.1.2. Metody nestacionární.

Konkrétní dynamické metody pro měření součinitele tepelné vodivosti nejsou podle ČSN stanoveny. Právě tyto metody jsou však pro danou technologii výhodné, protože jsou poměrně rychlé a dostatečně přesné. Absolutní přesnost je zde sice menší než u metod stacionárních, ale pro měření porovnávací jsou tyto metody ideální. Nestacionární metody jsou charakterizovány:

- 1) není třeba čekat na dosažení ustáleného toku tepla vekušebním zařízení
- 2) výsledkem měření není pouze jediná hodnota (odpovídající teplotě, na kterou bylokušební zařízení nastaveno, jako u metod stacionárních), ale průběh parametrů v závislosti na teplotě

Aby bylo možno metod založených na neustáleném toku tepla prakticky využít, je třeba dodržet:

- 1) určitý tvarkušebního vzorku (obvykle destička nebo váleček s danými podmínkami)
- 2) podmínky přívodu tepla

Nejběžnější případy používaných zdrojů tepla:

- a) impulsní zdroje tepla
- b) zdroje tepla s konstantním výkonem
- c) ohřev konstantní rychlostí

Vzhledem ke zkušenostem s měřením tepelné vodivosti na katedře fyziky VŠST Liberec byla při našich měřeních použita metoda s využitím zdroje tepla s konstatním výkonem a to její modifikace založená na teorii regulárního režimu (viz 3.1.).

### 2.2.2. Měření specifického tepla.

Specifické teplo je množství tepla, které je nutno přivést látce o hmotnosti 1 kg, aby se ohřála o 1°C. Jednotkou je [J/kg · °C], [kcal/kg · °C]. Součin  $c \cdot m$ , kde  $m$  je hmotnost látky v kg, nazýváme tepelnou kapacitou látky.

#### 2.2.2.1. Kalorimetrické metody.

Měření specifického tepla směšovacími kalorimetry je založeno na zákonu zachování tepla. Přivedeme-li těleso tepelné kapacity  $m_1 c_1$  a teploty  $t_1$  do tepelného styku s druhým tělesem kapacity  $m_2 c_2$  a nižší teploty  $t_2$ , vyrovnají se teploty obou těles na společnou teplotu  $t$ . Není-li tepelných ztrát a jsou-li obě tělesa navzájem chemicky netečná, je teplo  $m_1 c_1 (t_1 - t)$ , vydané teplejším tělesem, rovno teplo  $m_2 c_2 (t - t_2)$ , přijatému chladnějším tělesem, tedy

$$m_1 c_1 (t_1 - t) = m_2 c_2 (t - t_2)$$

Z tohoto, tak zvaného směšovacího pravidla, lze vypočítat specifické teplo jednoho tělesa, známe-li specifické teplo druhého tělesa a zjistíme-li měření velikost ostatních veličin v rovnici.

Tyto metody jsou velmi přesné, ale jde zase o měření stacionární, protože je nutno dbát na dokonalé vyrovnání teplot. Protože se u směšovacích kalorimetrů používá kapalného média, je tato metoda měření specifického tepla pro sádku prakticky nepoužitelná.

### 2.2.2.2. Nestacionární metody.

Nestacionární metody měření specifického tepla  $c$  jsou založeny na stejném principu jako nestacionární metody měření tepelné vodivosti  $\lambda$ , jejichž princip byl popsán v kapitole 2.2.1.2. Při konstrukci měřicích přístrojů pro určování tepelné vodivosti  $\lambda$  a specifického tepla  $c$  se využívá faktu, že časový průběh teploty zkoumaných vzorků je závislý jak na  $\lambda$  tak na  $c$ . Ze dvou nezávislých pokusů lze tedy určit obě hodnoty měřením na jednom zařízení (viz 3.2.).

### 2.2.3. Měření objemové váhy.

Objemová váha  $\gamma$  není tepelně-fyzikální parametr. Z rovnice (1) je ale patrné, že ke konečnému měření koeficientu tepelné akumulace formy  $b_f$  je stanovení objemové váhy nutné. Výpočet objemové váhy byl v našich měřeních stanoven na základě dilatací sádrových vzorků. Popis měření a výpočtové vztahy jsou uvedeny v kapitole 3.4.

### 2.3. Metoda experimentálně početního stanovení koeficientu tepelné akumulace formy.

Tepelně-fyzikální vlastnosti formovacích materiálů výrazně ovlivňují tuhnutí a chladnutí odlitků ve formách. Poměrně dobře jsou zpracovány problémy tuhnutí odlitků a to vyjádřením doby tuhnutí odlitků ve formě vztahem podle Chvorinova /18/:

$$\tau_{\text{tuh}} = \frac{R^2}{k^2} \quad [\text{hod}] \quad (3)$$

kde  $R$  .... poměrná tloušťka odlitku  $[\text{m}]$

$$R = \frac{V}{F}$$

$V$  - objem odlitku  $[\text{m}^3]$   
 $F$  - plocha odlitku  $[\text{m}^2]$

$k$  .... konstanta tuhnutí

Konstanta tuhnutí vyjadřuje v podstatě rychlost růstu ztuhlé kůry odlitku a tím i rychlost tuhnutí jako celku.

Na základě vztahu (3) vyjadřují různí autoři různými způsoby konstantu tuhnutí a koeficient tepelné akumulace formy. Bližší popisy jednotlivých způsobů a předpoklady jejich řešení jsou uvedeny v /20/.

### 2.3.1. Vejnikovova metoda řešení tuhnutí odlitků.

Tato metoda vyžaduje nejdříve provedení experimentu, neboť pro danou soustavu odlitek-forma je nutno zjistit, zejména v okamžiku konce tuhnutí, rozložení teploty ve formě v závislosti na čase.

Koeficient tepelné akumulace formy  $b_f$  se z naměřených hodnot v okamžiku ztuhnutí odlitku vypočte ze vzorců, které Vejnik /19/ získal následující úvahou.

V okamžiku, kdy skončilo tuhnutí předal odlitek formě právě celé krystalizační teplo:

$$Q_k = R \cdot F \cdot \gamma \cdot L \quad [\text{kcal}]$$

F .... plocha styku odlitku s formou  $[\text{m}^2]$

L .... latentní teplo krystalizační  $[\text{kcal/kg}]$

Toto teplo tedy musela forma během tuhnutí pohltit. Z toho důvodu se forma prohřeje do určité hloubky od plochy styku s odlitkem. Účelem experimentální práce je zjistit právě hloubku této tepelně ovlivněné vrstvy (dána hodnotou  $x_f$ ), ve které se akumuluje teplo  $Q_{2ak}$ . Za předpokladu, že si jsou obě uvedená tepla rovna, můžeme sestavit rovnici, ve které krystalizační teplo odlitku i akumulované teplo ve formě budou charakterizovány fyzikálními vlastnostmi formovacího materiálu a kovu a rozložením teplot ve stěně formy.

Skutečný průběh teploty ve formě v okamžiku konce tuhnutí nahrazuje Vejník parabolou nebo sinusoidou. Tato křivka se má co nejvíce blížit skutečnému průběhu teplot ve formě.

Zavedením těchto závislostí do rovnice pro výpočet akumulovaného tepla  $Q_{2ak}$  a řešením této rovnice s rovnicí pro uvolněné krystalizační teplo odlitku  $Q_k$  vycházejí Vejníkovi tyto vzorce pro stanovení koeficientu  $b_f$ :

a) při použití náhradní křivky paraboly

$$b_f = \frac{R \cdot \gamma \cdot L}{\vartheta_{kr} \sqrt{\frac{2n_f}{n_f+1} \cdot \tau}} \quad [\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hod}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (4)$$

Parabola je vyjádřena v souřadnicích  $(x, \vartheta)$  vztahem

$$\vartheta = \vartheta_{kr} \cdot \left(1 - \frac{x}{x_f}\right)^{n_f} \quad (5)$$

$n_f$  .... stupeň paraboly

b) při použití náhradní křivky sinusoidy

$$b_f = \frac{R \cdot \gamma \cdot L}{\sqrt{\pi-2} \cdot \vartheta_{kr} \cdot \sqrt{\tau}} \quad (6)$$

Křivka je vyjádřena v souřadnicích  $(x, \vartheta)$  vztahem

$$\vartheta = \vartheta_{kr} \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{x_f}\right) \quad (7)$$

Schematické znázornění náhrady skutečného průběhu teploty je na obr. 1.

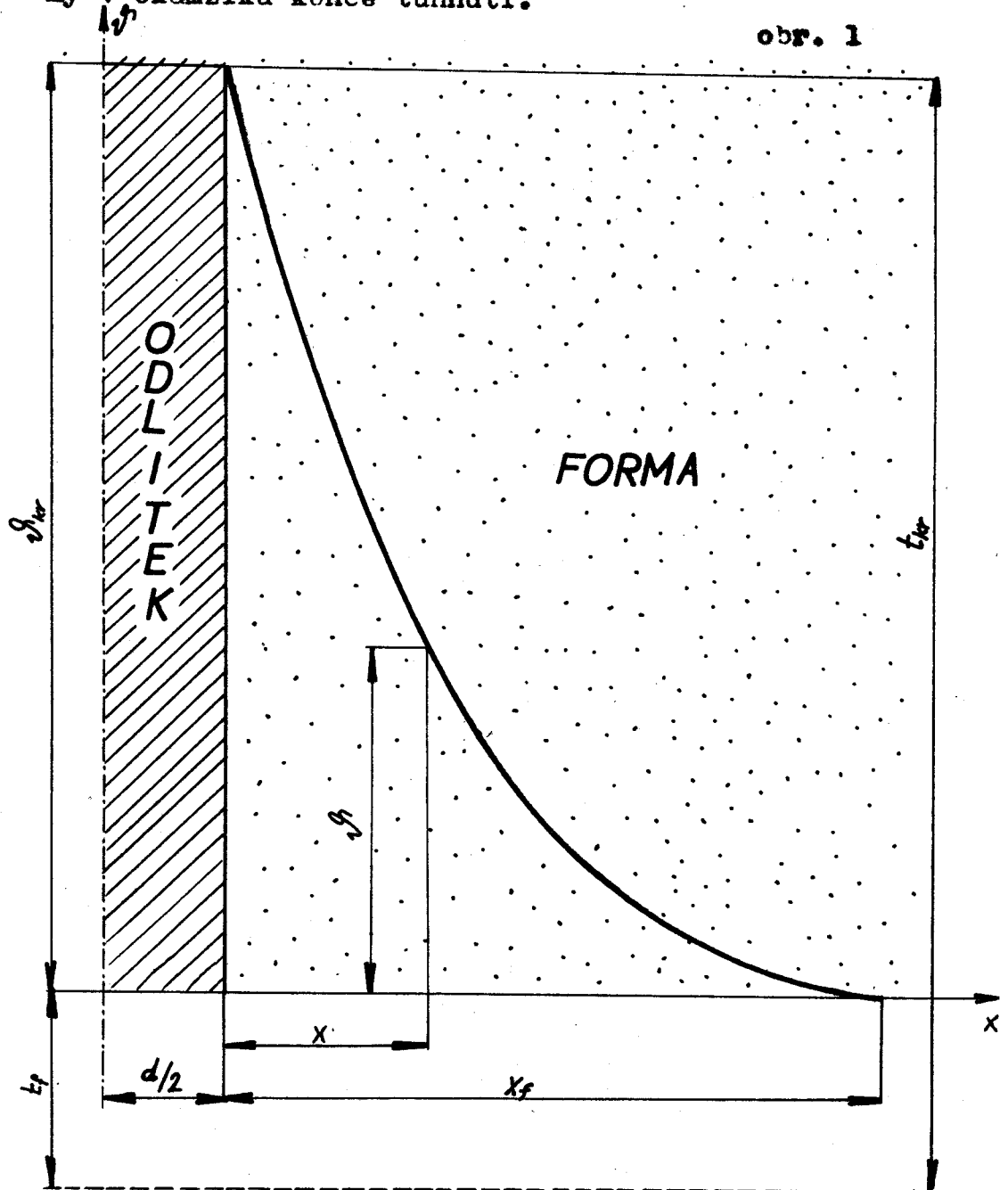
Význam hodnot označených na obr. 1.:

$\vartheta$  .... rozdíl teploty na křivce rozložení teplot ve stěně formy ve vzdálenosti  $x$  od povrchu rozhraní odlitek-forma a výchozí teploty formy [ $^\circ\text{C}$ ]



- $\Delta t_{kr}$  ..... rozdíl teploty na povrchu odlitku a výchozí teploty formy  $[^{\circ}\text{C}]$   
 $x_f$  ..... vzdálenost neovlivněného místa  $[\text{m}]$   
 $t_f$  ..... výchozí teplota formy  $[^{\circ}\text{C}]$   
 $t_{kr}$  ..... teplota povrchu odlitku  $[^{\circ}\text{C}]$

Křivka udává teoretické rozložení teplot ve stěně formy v okamžiku konce tuhnutí.



### 3. P O P I S M Ě Ř E N Í T E P E L N Ě - F Y Z I K Á L - N Í C H P A R A M E T R U

#### 3.1. Regulární režim.

V praxi tepelných měření se přednostně používají takové tepelné režimy systémů nebo těles, které vyhovují zjednodušeným předpokladům funkční závislosti teploty prostředí na čase, tj. předpokladům o tvaru funkce  $\theta = F(\tau)$ , a o tvaru systému nebo tělesa.

Předpokládejme systém těles, kde předávání tepla probíhá v soulase s Fourierovým zákonem. Zdroje tepla v systému chybí; je-li teplota prostředí nezávislá na čase, systém se bude ochlazovat či ohřívát. Teplota  $t_M$  v libovolném bodě M systému bude podle Kondratjeva /1/:

$$t_M - \theta = \sum_{j=0}^{\infty} A_j \cdot U_j \cdot e^{m_j} \cdot j^{\tau} \quad (8)$$

kde  $m_j$  ..... řada kladných rostoucích čísel

$$m_0 < m_1 < m_2 < \dots < m_j < m_{j+1} < \dots \quad (9)$$

$U_j$  ..... funkce souřadnic bodů systému, nezávisí na čase  $\tau$ ; jsou zde zahrnuty fyzikální konstanty materiálu systému a koeficient přestupu tepla na povrchu S

$A_j$  ..... konstanty, nezávislé na souřadnicích ani čase; jsou stanoveny z počátečních podmínek, tj. z podmínek teplotního pole v čase  $\tau = 0$ :

$$t_0 - \theta = \sum_{j=0}^{\infty} A_j \cdot U_j$$

je zde zahrnut také koeficient přestupu tepla

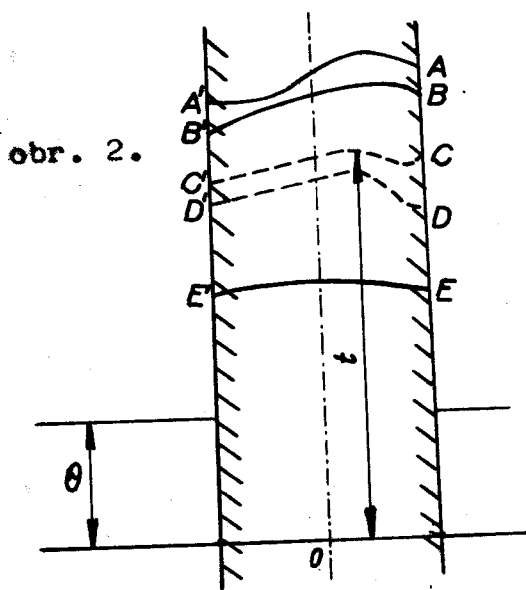
$m_0, m_1 \dots$  konstanty, nezávislé na souřadnicích  
bodu M a čase; závisí na:

- 1) fyzikálních vlastnostech  $\lambda, \gamma$  materiálů systému
- 2) koeficientu přestupu tepla  $\alpha$
- 3) tvaru, rozměrech a vzájemné poloze částí systému

Z nerovnosti (9), rovnice (8), Fourierova zákona a závěrů získaných z pokusů s ochlazováním a ohřevem těles lze stanovit základní zákony teorie regulárního režimu I. druhu. Teorie odpovídá na otázku, jak se mění teplotní pole systému a časem při ochlazování tělesa při zachování podmínek

$$\theta = \text{konst}, \quad \alpha = \text{konst}$$

Tepelná evoluce systému se rozpadá na tři stadia. První je charakterizováno prudkým vlivem na teplotní pole systému v jeho počátečním stavu, který má charakter nahodilý, nezávislý na vlastnostech systému a podmínkách, ve kterých proces ochlazování systému probíhá.



Rozložení teplot v rovinné desce, ochlazované z obou stran, pro různé časové intervaly ukazuje obr. 2. Křivka AA' udává rozložení teplot v desce v čase  $\zeta_0$  - je to nepravidelná složitá křivka. Stejný charakter má i křivka BB', odpovídající času  $\zeta_1$ , blízkému  $\zeta$ . S průběhem času se celý proces postupně dostává ze stadia neuspořádaného - irregularního, do stadia uspořádaného - regulárního, charakterizova-

ného křivkou EE'. Vliv nerovnoměrnosti počátečního pole systému na jeho další stav zde už nemá vliv a zákon směny jeho teplotního pole dostává tvar:

$$t_{M, \text{reg}} - \theta = A_0 \cdot U_0 \cdot e^{-m_0 \cdot \tau}$$

Jestliže předpokládáme, že sledované časové okamžiky  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  začínají v čase  $\tau_0 = 0$ , pak se členy řady (8) zmenšují v absolutní hodnotě, tak jako se zmenšují s růstem výrazy

$$e^{-m_0 \cdot \tau}, e^{-m_1 \cdot \tau}, e^{-m_2 \cdot \tau}, \dots$$

blíží se k nule. Toto zmenšování však neprobíhá stejně rychle; členy řady (8) (počínaje druhým, kdy  $j=1$ ) nabývají brzy malých hodnot ve srovnání s prvním členem řady. Proto teplota  $t_M$  v libovolném bodě M systému bude ještě dlouho do té doby, kdy bude mít hodnotu  $\theta$ , vyjádřena prvním členem řady (8).

Na základě těchto úvah vyslovuje Kondratjev /1/ 1. základní tezi teorie regulárního režimu I. druhu.

Regulární režim, nastávající po uplynutí dostatečné doby od začátku ochlazování, je charakterizován tím, že v okamžiku jeho začátku se teplotní pole systému mění podle exponenciálního zákona

$$t_M - \theta = \psi = A \cdot U \cdot e^{-m \cdot \tau}$$

Jinými slovy, že ln rozdílu mezi teplotou  $t_M$  v libovolném bodě M systému a teplotou okolního prostředí se mění podle

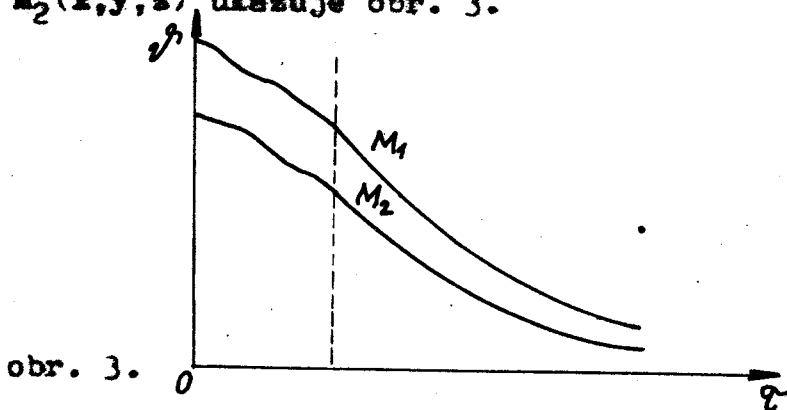
$$\ln \psi = -m \cdot \tau + G(x, y, z)$$

kde  $G$  ..... funkce souřadnic, přičemž rychlost jeho změny

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\ln \psi) = -m$$

je stejná pro všechny body systému.

Tato teze platí i pro případ ohřevu systému, tj. pro  $\theta > t_M$ . Veličinu  $n$  nazýváme tempo ochlazování. Charakterizuje rychlost ochlazování celého systému nezávisle na poloze bodu  $M$ . Rychlost změny teploty v libovolném bodě je v různých bodech různá, v daném bodě se její hodnota mění v závislosti na čase. Při ochlazování tělesa ze špatně vodivého materiálu, rovnoměrně zahřátého, klesá teplota v bodech vnějšího povrchu mnohem rychleji než ve středu tělesa. Teplota na povrchu už značně poklesla, kdežto ve středu se změnila velmi málo. Později, když začal regulární režim, mění střední část svoji teplotu stejně rychle jako povrch. Čím větší je  $n$ , tzn. čím strmější je křivka ochlazování, tím rychleji se materiál ochlazuje jako celek. Křivky ochlazování dvou libovolných bodů systému o souřadnicích  $M_1(x, y, z)$   $M_2(x, y, z)$  ukazuje obr. 3.



obr. 3.

Při charakterizování tepelných procesů se používají různá kritéria podobnosti. Hrají velkou roli i při stanovení výměny tepla, tzn. i v teorii regulárního režimu. K důkazu průběhu regulárního režimu však stačí sestavení grafické závislosti  $\ln t, t$ . V oblasti regulárního režimu musí být závislost přímková.

Máme-li plně určenou soustavu těles a pozorujeme-li tempo jejího ochlazování nebo ohřevu v různých podmínkách - při různých hodnotách  $\alpha$  v širokém jejich rozsahu, vedou získané poznatky k vyslovení 2. zákona teorie regulárního

Kalorimetr pracuje jako  $\lambda$ -kalorimetr (měří tepelnou vodivost) nebo jako c-kalorimetr (měří specifické teplo).

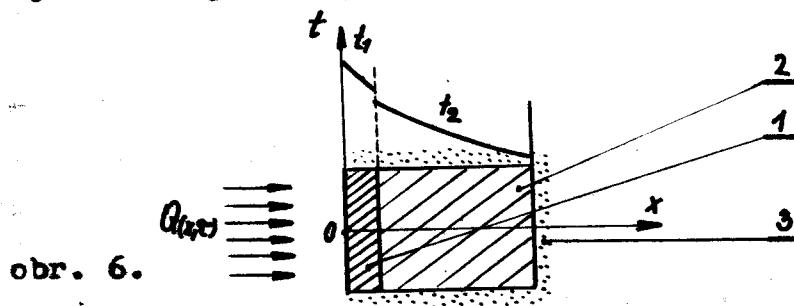
Kalorimetr  $\lambda$  - zkoušeným vzorkem je zde destička 1.

Konstrukce bloku musí zabezpečovat plynulou výměnu jedné destičky druhou.

Kalorimetr c - zkoušeným vzorkem je váleček 2, blok zabezpečuje jejich rychlou výměnu.

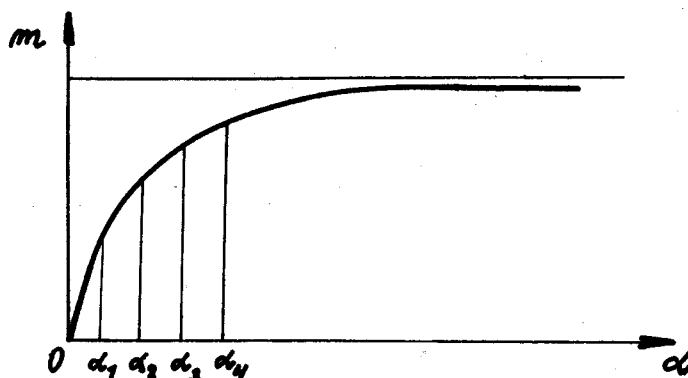
Měřený vzorek (destička nebo váleček), se uloží dovnitř kovového bloku, který mění následkem ohřevu v daném časovém intervalu monotónně svoji teplotu. Proud tepla postupuje přes základ do destičky, válečku a zvonu. Střední povrchové teploty zvonu a válečku se podaří při zkoušce udržet sobě blízké. Konstrukce bloku zabezpečuje tepelnou izolaci odkrytých částí povrchu destičky a válečku tak, že váleček se ohřívá tepelným tokem, postupujícím ze strany destičky.

Platunov odvozuje výpočtové vzorce při následujících zjednodušujících předpokladech (obr. 6.):



- 1) ohřev destičky 1 a válečku 2 se uskutečňuje uvnitř bloku pouze ze strany základu, otevřené povrchové části jsou obklopeny ideální teploizolací 3.
- 2) destička má jedno-rozměrné teplotní pole, jehož gradient prochází její normálou - osou x
- 3) spády teploty v destičce a jádře se při ohřevu kalorimetru udržují dostatečně malé
- 4) tepelná kapacita jádra převyšuje v krajním případě 10x tepelnou kapacitu destičky.

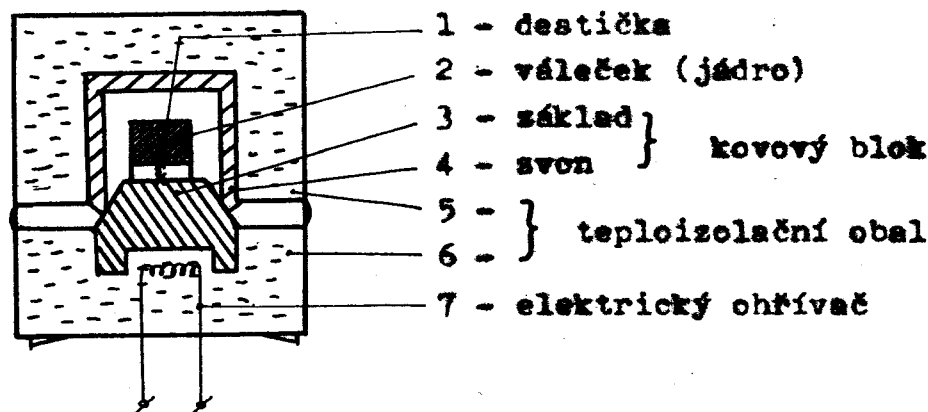
režimu, asymptotického. Každé hodnotě koeficientu přestupu tepla  $\alpha$  odpovídá určitá hodnota tepla ochlazování; při růstu působení tepla prostředí na systém (mírou působení je  $\alpha$ ) roste i protireakce systému -  $m$ . Při zvětšení  $\alpha$  směrem k  $\infty$  nabývá  $m$  konečnou hodnotu. Zobrazíme-li funkci  $m = f(\alpha)$  graficky, dostaneme křivku s asymptotou rovnoběžnou s osou  $\alpha$ , ležící od ní ve vzdálenosti  $m_{\infty} = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} f(\alpha)$  (obr. 4.). Tedy, ochlazuje-li se daný systém v podmínkách stále rostoucích  $\alpha$ , jeho tepla ochlazování rostou, ale ne nekonečně.



obr. 4.

### 3.2. Popis měřicí aparatury a odvození výpočtových vzorců.

Velké uplatnění v tepelných měřeních má teorie regulárního ochlazování nebo ohřevu těles, nazvaných bikalorimetry regulárního režimu. Platunov /2/ navrhuje pro měření tepelné vodivosti a specifického tepla konstrukci bikalorimetru podle obr. 5.



obr. 5.

V soulase s předpokladem 1) se tepelný tok  $Q(x, \tau)$ , procházející přes průřez  $x$  uvnitř destičky, plně rozděljuje na změnu tepelného obsahu jádra a příslušné části destičky:

$$Q(x, \tau) = c_2 \cdot P_2 \cdot \frac{dt_{2v}}{d\tau} + \frac{\delta_1 - x}{\delta_1} \cdot c_1 \cdot P_1 \cdot \frac{dt_{1v}}{d\tau} \quad (10)$$

kde  $c_2, c_1$  .... specifická tepla jádra a destičky v příslušném časovém okamžiku  $\tau$  ve významu jejich středních objemových teplot  $t_{1v}$ ,

$P_2, P_1$  .... váha jádra a destičky  
 $\delta_1$  .... tloušťka destičky

Z druhé strany (podle Fourierova zákona) pro průřez  $x$  destičky platí:

$$Q(x, \tau) = -\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \frac{dt(x, \tau)}{dx} \quad (11)$$

kde  $\lambda_1$  .... koeficient tepelné vodivosti destičky při teplotě  $t_{1v}$   
 $S_1$  .... průřez destičky v kolmici k tepelnému toku plochy

Aby byly závislosti (10) a (11) vhodné pro praktické použití, měříme tepelný tok vzhledem k takové vrstvě, jejíž gradient tepelného pole je stejný se středním gradientem tepelného pole destičky  $\frac{\Delta t_1}{\delta_1}$ . Poloha dané vrstvy v destičce se definuje charakterem jejího tepelného pole. V soulase s tím lze tepelné pole destičky v kalorimetru s dostatečnou přesností aproximovat pro praktické výpočty parabolou ve tvaru:

$$t(x, \tau) = A(\tau) + B(\tau) \cdot x + D(\tau) \cdot x^2 \quad (12)$$



Odtud je vidět, že kvalita nás zajímající vrstvičky může být při pokusech nahrazena střední vrstvou, pro kterou platí:

$$\frac{\Delta t_1}{\delta_1} = - \frac{dt \left( \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_1, \tau \right)}{dx} \quad (13)$$

S použitím rovnice (13) v rovnicích (10) a (11) dostáváme:

$$\lambda_1 = \frac{\tilde{\sigma}_1}{S_1 \cdot \Delta t_1} \cdot \left( c_2 \cdot P_2 \cdot \frac{dt_{2v}}{d\tau} + \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot P_1 \cdot \frac{dt_{1v}}{d\tau} \right) \quad (14)$$

$$c_2 = \frac{1}{P_2 \cdot \frac{dt_{2v}}{d\tau}} \cdot \left( \lambda_1 \cdot S_1 \cdot \frac{\Delta t_1}{\tilde{\sigma}_1} - \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot P_1 \cdot \frac{dt_{1v}}{d\tau} \right) \quad (15)$$

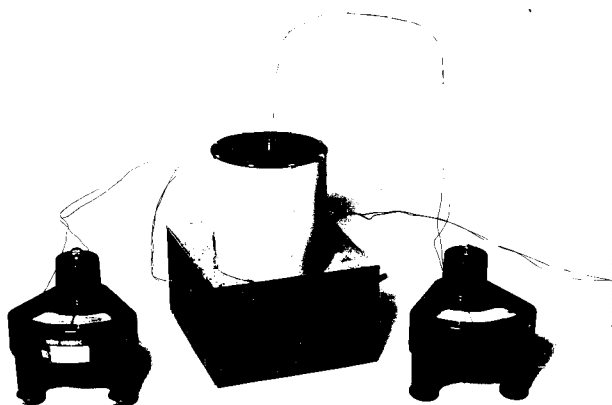
Parametr  $\frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot P_1 \cdot \frac{dt_{1v}}{d\tau}$  vstupuje na základě předpokladu 4) do vzorců ve tvaru bezvýznamné opravy, takže tepelný obsah destičky je při pokusech možno hodnotit jen přibližně, rychlost její teplotní změny lze přirovnat k rychlosti změny teploty jádra. Při tom měření  $\frac{\Delta t_1}{\tilde{\sigma}_1}$  se dá bez významnější chyby vztáhnout ke střední vrstvě (viz předpoklad 4)) také v těch případech, kdy tepelné pole destičky se z jakýchkoliv příčin značně odlišuje od paraboly (12). Jako výsledek dostáváme při předpokladu  $c_2 \cdot P_2 \gg c_1 \cdot P_1$  zjednodušený výsledný vztah: pro obě hodnoty:

$$\lambda_1 = \frac{\tilde{\sigma}_1 \cdot c_2 \cdot P_2}{S_1 \cdot \Delta t_1} \cdot \frac{dt_{2v}}{d\tau} \quad (16)$$

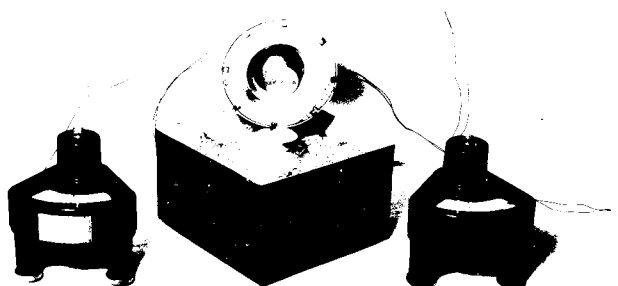
$$c_2 = \frac{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \Delta t_1}{\tilde{\sigma}_1 \cdot P_2 \cdot \frac{dt_{2v}}{d\tau}} \quad (17)$$

Kalorimetr, na němž byla prováděna naše měření byl skonstruován podle návrhu Platunova (obr. 7. a 8.). Popis jeho částí a princip měření byl proveden v předchozích odstavcích. Umístění termočlánků při měření tepelné vodivosti je naznačeno na obr. 9. (termočlánek ve stěně zvonu umožňuje orientační určení rozdílu teplot mezi jádrem a zvonem) a při měření specifického tepla na obr. 10.

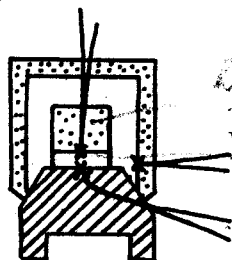
obr. 7



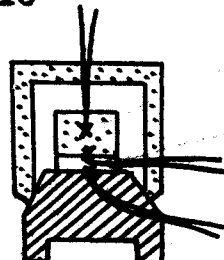
obr. 8



obr. 9



obr. 10



Pro měření tepelné vodivosti byly použity termočlánky Cu-konstantan s  $\varnothing$  drátu 0,5 mm, pro měření specifického tepla termočlánky Fe-konstantan s  $\varnothing$  drátu 0,3 mm. Větve termočlánků byly izolovány keramickými trubičkami a připojeny na dvanáctibodový zapisovač. Posuv papíru v zapisovači byl pro měření tepelné vodivosti 200 mm/hod, každých 12 vteřin se prováděl zápis jednoho bodu, pro měření specifického tepla byl posuv 600 mm/hod a zápis jednoho bodu byl po 3 vteřinách.

Výsledkem měření jsou časové záznamy průběhu teploty v závislosti na čase, ze kterých vycházíme při vyhodnocování měření.

### 3.3.. Ověření přesnosti měření.

#### 3.3.1. Ověření zjednodušujících předpokladů (viz 3.2.)

ad 1) Tento předpoklad není ve skutečných podmínkách nikdy splněn. Mezi jádrem a zvonek je vždy určitý rozdíl teplot. Celkový tepelný tok mezi nimi může být zahrnut do opravy k výpočtovým vzorcům. Vzorce (16) a (17) se zahrnutím opravy mají podle /2/ tvar:

$$\lambda_1 = \frac{\tilde{\sigma}_1 \cdot c_2 \cdot P_2}{S_1 \cdot \Delta t_1} \cdot \frac{dt_{2v}}{dt} + A \cdot \Delta t_{2-4}$$

$$c_2 = \frac{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \Delta t_1}{P_2 \cdot \tilde{\sigma}_1 \cdot \frac{dt_{2v}}{dt}} - \frac{A \cdot \Delta t_{2-4}}{\frac{dt_{2v}}{dt}}$$

kde:  $A \cdot \Delta t_{2-4}$  ..... efektivní tepelný tok mezi jádrem a zvonek

$\Delta t_{2-4}$  ..... rozdíl středních povrchových teplot jádra a zvonu

Koeficient  $A$  získáme analyticky; zahrnuje tepelnou vodivost, konvekci, záření uvnitř uzavřené vzduchové mezivrstvy mezi jádrem a zvonem. Nabývá tvaru:

$$A = \frac{\pi \cdot \lambda_v \cdot \epsilon_k}{\frac{1}{D_{2v}} - \frac{1}{D_{4v}}} + 8\pi \cdot D_{2v}^2 \cdot \zeta_k (t_{2v} + 273)^3$$

kde:  $\lambda_v = \lambda_v(t_{2v})$  .... koeficient tepelné vodivosti vzduchu při  $t_{2v}$   
 $\epsilon_k$  .... ukazatel konvekce vzduchu v mezivrstvě  
 $\zeta_k$  .... redukovaná konstanta pro vyzařování povrchů jádra a zvonu  
 $D_{2v}, D_{4v}$  .... vnitřní a vnější rozměr vrstvy

Jsou-li boční povrchy jádra a zvonu cylindrické, je možno vyjádřit:

$$D_{2v} = \sqrt[3]{3 \cdot D_2^2 \cdot H_2}$$

$$D_{4v} = \sqrt[3]{3 \cdot D_4^2 \cdot H_4}$$

kde:  $D_2, D_4$  .... průměr jádra a vnitřní strany zvonu  
 $H_2, H_4$  .... výška jádra a vnitřní strany zvonu

Měření bylo ověřeno, že efektivní tepelný tok mezi jádrem a zvonek je natolik malý, že tato korekce může být při našich výpočtech zanedbávána.

ad 2) Tento předpoklad byl splněn úpravou rozměrů destičky. Destička má menší rozměr než základ a váleček, byly tedy odstraněny okrajové jevy, které by ovlivnily prostup tepla.

ad 3) Malé spády teploty v destičce a válečku se udržují při ohřevu kalorimetru malé z toho důvodu, aby nedocházelo při určování funkčních závislostí  $\lambda = \lambda(t)$  a  $c = c(t)$  k tzv. intervalovým hodnotám (to znamená, že bychom v opačném případě určili hodnoty  $\lambda$  a  $c$  nikolivkurčité teplotě ale k teplotnímu intervalu). Tento předpoklad byl lépe splněn u měření tepelné vodivosti. Při měření specifického tepla byl teplotní spád větší, takže poněkud ovlivnil přesnost měření.

ad 4) Tento předpoklad byl splněn; teplo, jež pohltí destička je možno zanedbat proti teplu, jež pohltí váleček.

Pro zachování podmínek přesnosti měření je nutno se vyrovnat také s tepelnými odpory na kontaktech, to jest ve styku základu, destičky a válečku.

Teplotní spád mezi základem a válečkem je úměrný součtu tepelných odporů destičky  $R_D$  a odporů na kontaktech  $R_{DP}$  a  $R_{HP}$ . Musí platit, že

$$R_D \gg R_{HP} + R_{DP}$$

kde:  $R_{DP}$  .... tepelný odpor na styku základu a destičky  
 $R_{HP}$  .... tepelný odpor na styku destičky a válečku

Tuto podmínku je možno dodržet v podstatě dvěma způsoby:

- 1) úpravou ploch - vzorky pro měření tepelné vodivosti byly odlévány do formy z plexiskla, takže jeden povrch byl hladký a druhý byl vyhlazen před stuhnutím sádry ve formě; váleček pro měření specifického tepla měl spodní plochu vyhlazenu metalografickým papírem
- 2) dodržením velkého tepelného odporu destičky ( $R_D$ )

V případě měření tepelné vodivosti, kdy je zkušebním vzorkem sádrová destička, byla druhá podmínka velkého  $R_D$  dostatečně dodržena, protože sádra je izolátor a destička byla dostatečně tlustá (cca 5 mm). Při měření specifického tepla byl tepelný odpor na styku destičky a válečku upraven umístěním termočlánku do destičky (obr. 10.) a plochy styku základu a destičky byly kovově lesklé.

Grafickým ověřením byla oblast regulárního režimu vymezena pro měření tepelné vodivosti v teplotním rozsahu 60 až 300°C, pro měření specifického tepla teplotním rozsahem 60 až 280°C, hodnota  $c$  pro 300°C v uvedených tabulkách a grafech je tedy pouze orientační.

### 3.3.2. Vliv navlhání sádry.

Tabulka I. ukazuje, jak se mění tepelná vodivost sádrových vzorků v závislosti na době mezi vyjmutím vzorků z pece po ukončeném žhání (viz 4.2.) a začátkem měření. První vzorek byl měřen okamžitě po vyjmutí z pece, druhý po 24 hodinách a třetí po 48 hodinách po vyjmutí z pece. Vzorky byly po tuto dobu ponehány volně na vzduchu. Zkouška byla provedena pro alabastrovou sádro A, porovnání je provedeno pro 13 vybraných hodnot.

Tabulka I.

t /°C/	$\lambda$ /kcal/m.h.°C/		
	1. měření	2. měření	3. měření
60	0,284	0,301	0,302
80	0,262	0,303	0,308
100	0,327	0,326	0,329
120	0,348	0,350	0,358
140	0,370	0,382	0,388
160	0,394	0,399	0,406
180	0,416	0,420	0,424
200	0,434	0,436	0,438
220	0,437	0,440	0,440
240	0,430	0,442	0,445
260	0,409	0,420	0,431
280	0,384	0,402	0,412
300	0,337	0,376	0,402

Z tabulky I. je patrné, že tepelná vodivost v závislosti na době měření se převážně zvyšuje, což je patrné možno přičíst vlivu navlhnutí vzorků.

### 3.3.3. Vliv degradace sádry.

Tabulka II. ukazuje změnu hodnot tepelné vodivosti v závislosti na vlivu následného ohřevu stejného vzorku. První měření vzorku bylo provedeno okamžitě po vyjmutí z pece, druhé po 24 hodinách a třetí po 48 hodinách po prvním měření. Vzorky byly po tuto dobu uloženy exikátoru. Měření byla provedena na vzorku ze směsi VK2 (viz 4.1.).

Z tabulky II. je patrné, že tepelná vodivost při následném ohřevu stejného vzorku klesá.

Tabulka II.

t /°C/	$\lambda$ /kcal/m.h.°C/		
	1. měření	2. měření	3. měření
60	0,515	0,486	0,396
80	0,543	0,505	0,424
100	0,524	0,524	0,448
120	0,596	0,543	0,477
140	0,624	0,564	0,500
160	0,648	0,577	0,524
180	0,682	0,596	0,543
200	0,706	0,615	0,548
220	0,734	0,620	0,543
240	0,730	0,615	0,534
260	0,724	0,610	0,519
280	0,710	0,586	0,490
300	0,662	0,515	0,424

### 3.4. Měření dilatací sádrových vzorků.

#### 3.4.1. Popis měřicí aparatury.

Celá konstrukce zařízení zabezpečuje dodržení správných podmínek měření. Základní částí zařízení je snímač s pohybujícím se pouzdrem. K tyčce pouzdra je přichycena trubička z křemenného skla o  $\varnothing$  6 mm. Její pohyb je veden v křemenné trubce o  $\varnothing$  12 mm, která je k pouzdru přilepena pryskyřicí. Trubka má na druhém konci vybroušen žlábek 70x7 mm, do kterého se vkládá sádrový vzorek. Aby bylo zaručeno přesné měření, opírá se vzorek jednou stranou o vloženou vybroušenou plošku a druhou stranou se dotýká vybroušené plošky trubičky o  $\varnothing$  6 mm. Dilatace se touto trubičkou přenáší do indukčního snímače. Odtud jde signál



k transistorovému zesilovacímu můstku TDA-3, odtud přes adaptér k zapisovači. Kondensátor v adaptéru slouží k odstranění střídavé složky výstupního signálu zesilovače. Na zapisovači registrujeme průběh dilatační křivky. Od vzorku, kde je umístěn termočlánek chromel-alumel, registrujeme v zapisovači průběh teplot.

Schema celého zařízení je v příloze 1. Elektrickou pecí je možno pohybovat po kolejnicích, připevněných k loži, které je společné i pro stojan snímače. Po vložení vzorku do výbrusu v křemenné trubce, vyměření jeho polohy a zasunutí termočlánu (obr. 11.), vynulujeme přístroje a najedeme s pecí tak, aby se vzorek dostal dovnitř. Automatické řízení teplotního režimu je provedeno elektrickým motorkem s různými převodovými stupni. Motorek odvíjí lanko se závažím, které je vedeno přes kolo transformátoru, který potom zvyšuje příkon topné spirály v elektrické peci do nastaveného maxima a potom opět pomalu snižuje až do vypnutí. Na obr. 12. je zařízení snímače s elektrická píčka před měření a na obr. 13. je uspořádání při měření.

### 3.4.2. Výpočet objemové váhy.

Pokud předpokládáme platnost  $\beta = 3\alpha$

$\beta$ ..... součinitel objemové roztažnosti

$\alpha$ ..... součinitel délkové roztažnosti

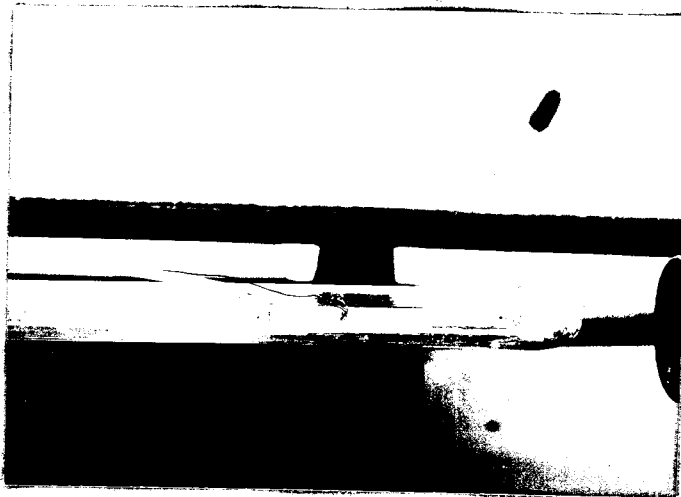
dá se změna objemové váhy v závislosti na teplotě vyjádřit vzorcem

$$\gamma(t) = \frac{\gamma_0}{1 + \frac{3\Delta t}{t_0}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (18)$$

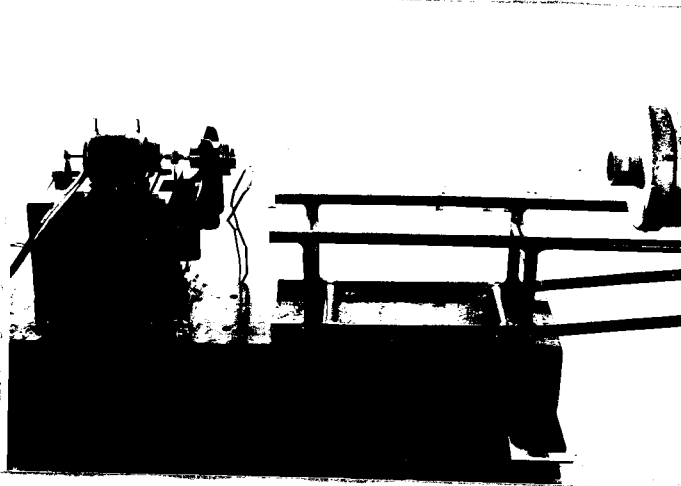
kde:  $\gamma_0 = \frac{G}{V_0}$  ..... původní objemová váha vzorku  $[\text{kg/m}^3]$   
 ..... váha vzorku (je považována za konstantní, protože po žhání nejsou vahové úbytky)  $[\text{kg}]$

$V_0$	..... původní objem vzorku	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta l$	..... dilatace vzorku	[m]
$l_0$	..... původní délka vzorku	[m]

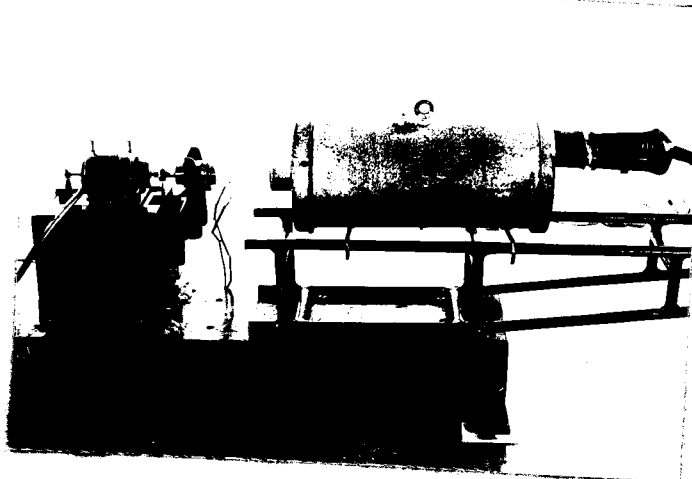
obr. 11



obr. 12



obr. 13



4. METODIKA VÝROBY VZORKŮ4.1. Sádrové směsi použité k výroběkušebních vzorků.

Složení všech směsí je udáno ve váhových procentech.

1.A - sáboastrová sádra

2.S - standardní směs: A 65 %

mastek mletý 5 %

moučka křemenná 30 %

3.B - stavební sádra

4.BS-:B 65 %

mastek mletý 5 %

moučka křemenná 30 %

5.V - směs vodivá: A 65 %

mastek mletý 5 %

karbid křemíku SiC 30 %

6.VK2 - : 98 % V

2 % křemelina

7.SK2 - : A 65 %

mastek mletý 5 %

moučka křemenná 28 %

křemelina 2 %

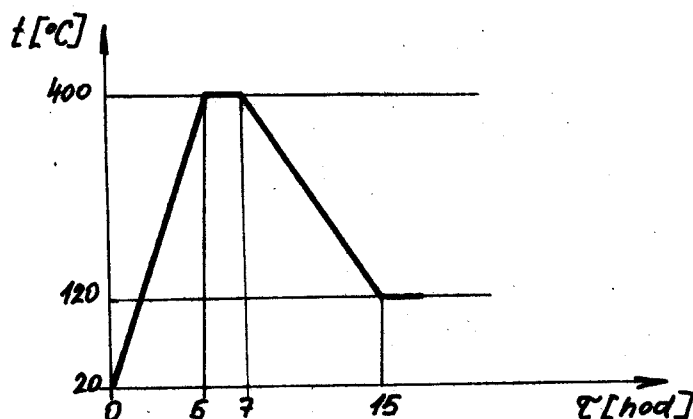
Na 100 % suchých složek přidáváme u každé směsi 70 % vody.

4.2. Příprava sádrových směsí a odlitíkušebních vzorků.

Jednotlivé sádrové směsi byly přesně naváženy dle složení a promíchány za sucha. Následovale cypání suché promísené směsi do nádoby a odměření množstvím vody. Pak byla směs odlita do příslušné připravené formy na vzorky a po 30 minutách tuhnutí a tvrdnutí na vzduchu byly vzorky z formy vyjaty.

#### 4.3. Teplotné spracovanie vzorky.

Bezprostredne po vyjatie vzorky z formy byly vzorky dany do sušičky, kde probíhalo sušení na  $50 - 60^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$  vždy po 24 hodinách. Pak následovalo žíhání v peci. Žíhací cyklus je znázorněn na obr. 14.



obr. 14.

Po vyjatie vzorky z pece byly vzorky uloženy do exikatoru se silikagelem, protože při ponechání na volném vzduchu by byly pro měření znehodnocovány (viz 3.3.2.). Bezprostředně před měření byly vzorky upraveny na řádný rozměr.

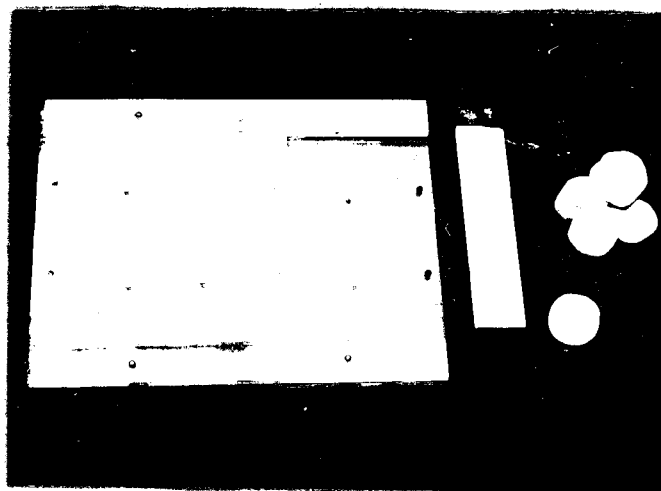
Postup uvedený v kapitolách 4.2. a 4.3. byl zachován u všech druhů a tvarů vzorků.

#### 4.4. Forma a tvar vzorků pro jednotlivá měření.

##### 4.4.1. Měření tepelné vodivosti.

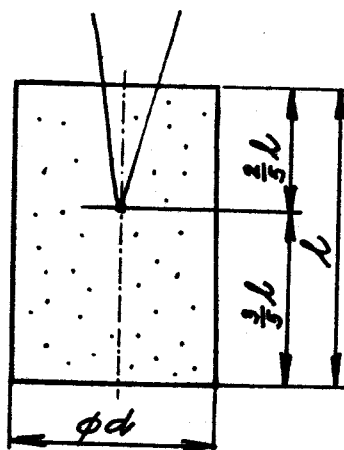
Výchozím tvarem pro výrobu kruhové destičky teoretických rozměrů  $\varnothing 25 \times 5$  mm byl obdélníkový vzorek o rozměrech  $125 \times 25 \times 5$  mm, které jsou na katedře technologie a nauky o materiálu VŠST Liberec vyráběny pro mechanické zkoušky sádrových vzorků. Do mříčkové formy z plexiskla (obr. 15.) jsme odlévali vždy tři vzorky najednou, abychom pro měření zajistili vzorky vyrobené za stejných podmínek.

obr. 15.



U každé směsi jsme měřili tři vzorky, každý z nich byl měřen třikrát, poprvé okamžitě po vyjmutí z pece, podruhé za 48 hodin a potřetí za dalších 48 hodin.

#### 4.4.2. Měření specifického tepla.



obr. 16.

Pro měření specifického tepla byl vyroben váleček o rozměrech  $\phi 30 \times 50$  mm. Při výrobě bylo nutno dodržet přesnou polohu termoizolantu podle obr. 16. Spodní plocha válečku byla před vlastním měřením vyhlazena metalografickým papírem. Forma a tvar vzorku jsou na obr. 17.

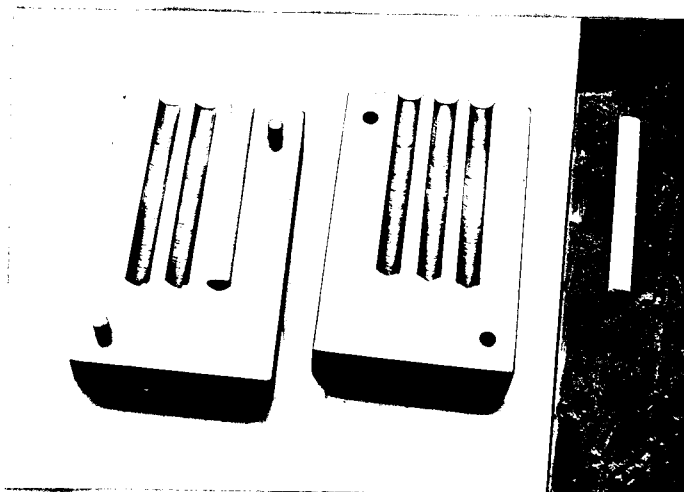
obr. 17.



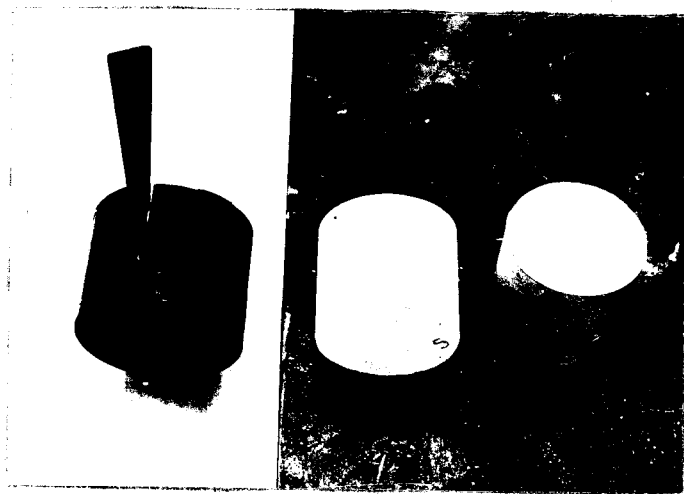
#### 4.4.3. Měření dilatací.

Pro zjišťování délkových změn byla vyrobena sádrová tyčinka  $\emptyset$  5x90-91 mm. Forma a tvar vzorku jsou na obr. 18. Pro zjišťování objemové váhy  $\gamma_v$  byly pro zvýšení přesnosti vyráběny vzorky větších rozměrů než vzorky, které byly vkládány do pístky. Forma a tvar těchto vzorků (teoretický rozměr  $\emptyset$  35x35 mm) je na obr. 19.

obr. 18.



obr. 19.



## 5. EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY

### 5.1. Měření tepelné vodivosti.

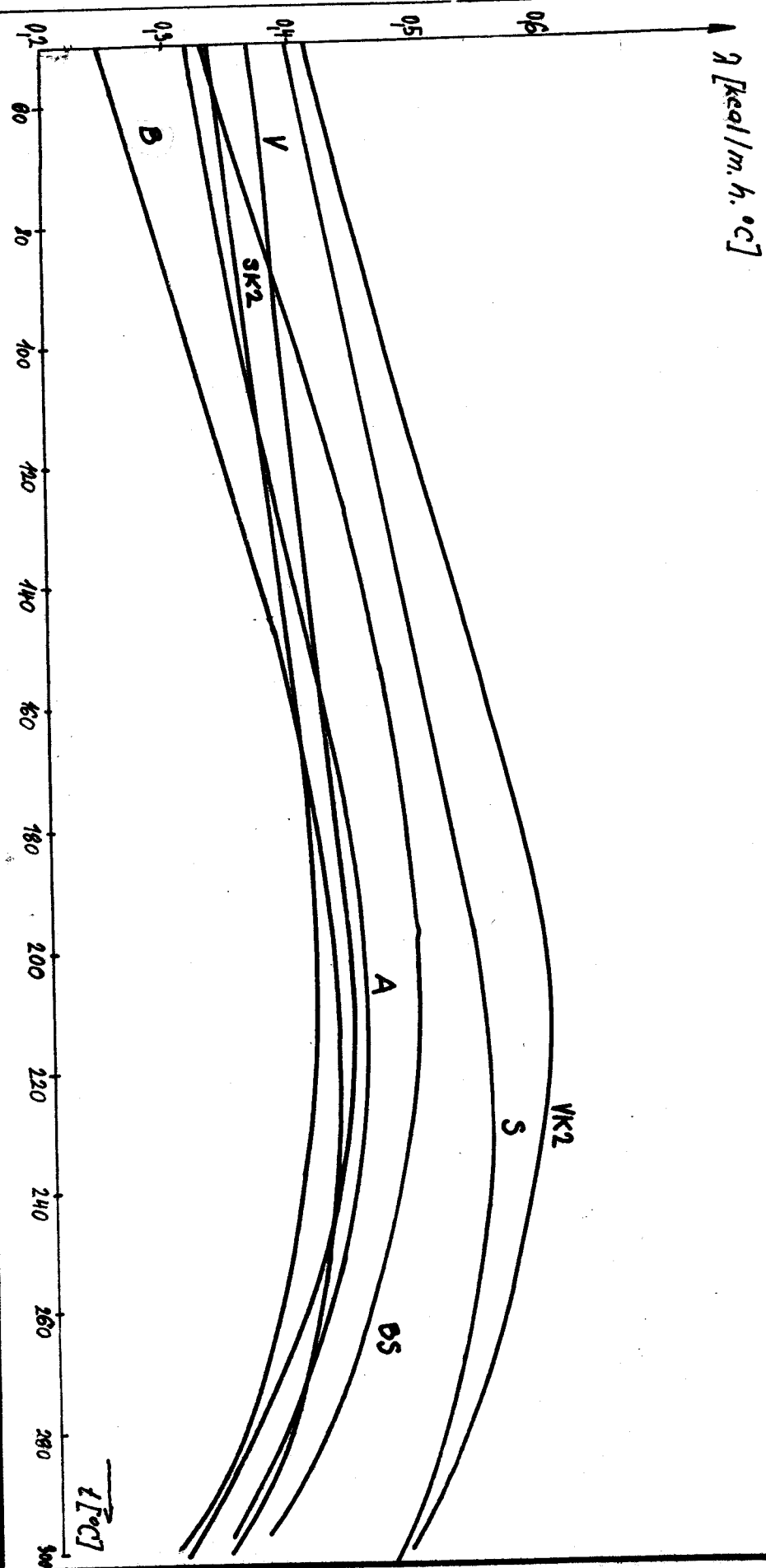
Hledanou závislost tepelné vodivosti na teplotě vypočtena podle rovnice (16)

$$\lambda_1 = \frac{\int_1 \cdot c_2 \cdot P_2}{S_1 \cdot \Delta t_1} \cdot \frac{dt_{2v}}{dt} \quad [\text{kcal/m.h.}^\circ\text{C}]$$

označení:  $\frac{dt_{2v}}{dt} \cdot \frac{1}{\Delta t_1} = A$

Materiálové konstanty  $\int_1$ ,  $S_1$ ,  $P_2$ ,  $c_2$  jsme získali měření příslušných vzorků. Výchozím podkladem pro výpočet hodnoty  $A$  jsou záznamy ze zapisovače. Křivky závislosti termoelektrického napětí na čase byly nahrazeny 50 body, které byly odečítány po třech minutách. Tyto body, pro něž byla určena teplota podle cejchovací tabulky termočlánků /10/, byly zadány počítači. Program počítače byl zpracován v MATu pro počítač MINSK 22. V programu je použita formule pro numerické určení funkce s pěti ekvidistantních hodnot funkce podle /9/. Program pro počítač je uveden v příloze 2.

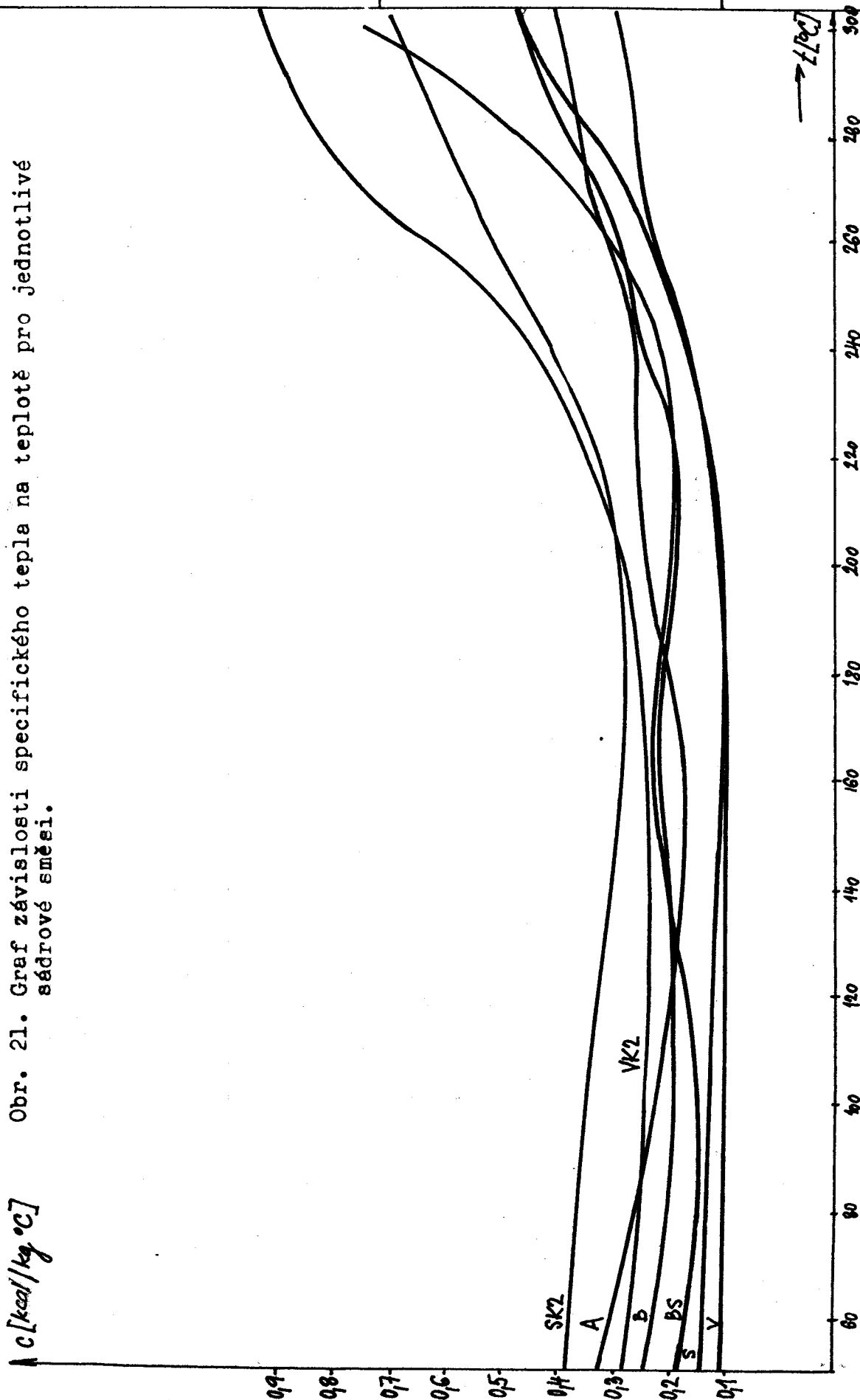
Porovnávací graf pro vypočtené hodnoty tepelné vodivosti v závislosti na teplotě pro jednotlivé sádrové směsi je na obr. 20. Po zkušenostech se srovnáním sádrových vzorků vlivem vlhkosti (3.3.2.) a vlivem degradace (3.3.3.) byly vyhodnocovány pouze vzorky měřené okamžitě po vyjmutí z pece. Směrodatná odchylka od střední hodnoty vypočtené tepelné vodivosti se pro jednotlivé sádrové směsi pohybovala v rozsahu 1 - 8 %.



Obr. 20. Graf závislosti tepelné vodivosti na teplotě pro jednotlivé sádrové směsi.



Obr. 21. Graf závislosti specifického tepla na teplotě pro jednotlivé sádrové směsi.



5.2. Měření specifického tepla.

Hledanou závislost specifického tepla na teplotě vypočítáme podle rovnice (17)

$$c_2 = \frac{\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \Delta t_1}{\rho_1 \cdot P_2 \cdot \frac{dt_{2y}}{dt}} \quad [\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}]$$

označení:  $\frac{\Delta t_1}{\frac{dt_{2y}}{dt}} = B$

Postup při výpočtu konečných hodnot je naprosto stejný jako při výpočtu tepelné vodivosti, pouze 50 bodů, jimiž byla nahrazena křivka závislosti termoelektrického napětí na čase, bylo odečítáno po 2 minutách. Program pro výpočet hodnoty B je uveden v příloze 3.

Porovnávací graf pro vypočtené hodnoty specifického tepla v závislosti na teplotě je pro jednotlivé sádrové směsi na obr. 21. Po zkušenostech získaných při měření tepelné vodivosti byly měřeny pouze vzorky okamžitě vyjmuté z pece.

Podrobné výsledky z počítače pro stanovení specifického tepla i tepelné vodivosti jsou ve zvláštní příloze k originálu této práce.

Zadáním této práce bylo uloženo stanovit závislosti  $\lambda$  a  $c$  na teplotě v rozsahu teplot  $20^\circ - 600^\circ\text{C}$ . Vymezení regulárního režimu znemožnilo stanovení teplotních závislostí pod  $60^\circ\text{C}$  a volba materiálů, použitých ke konstrukci kalorimetru, jenž byl k měření na katedře fyziky VŠST k dispozici, nedovolovala svyšení elektrického příkonu a tím měření za vyšších teplot. Byla proto navržena nová

konstrukce kalorimetru, lišící se v podstatě pouze v použití jiných materiálů k jeho výrobě. Vývojové dílny VŠST nemohly však zajistit jeho výrobu tak rychle, aby bylo možno na tomto kalorimetru provést měření. Měření byla tedy prováděna na kalorimetru starém, a proto nebylo možno dodržet teplotní rozmezí stanovené zadáním práce.

### 5.3. Měření objemové váhy.

Hledanou závislost objemové váhy na teplotě vypočítáme podle rovnice (18)

$$\rho(t) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{\lambda \Delta t}{l_0}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Nejprve je nutno přesně změřit a zvážit vzorky vyráběné pro stanovení  $\rho_0$  a zároveň měřením určit počáteční délku  $l_0$  vzorků vkládaných do dilatometru. Výchozím podkladem pro stanovení délkových změn jsou záznamy ze zapisovače, odkud získáváme v závislosti dilatací na teplotě pícky (je nutno použít cejchovací tabulky termočlánků). Teplota pícky byla zvyšována až do  $700^\circ\text{C}$  a po dosažení maxima snižována. Protože nebylo možno stanovit závislosti  $\lambda$  a  $c$  na teplotě v rozmezí  $300^\circ - 600^\circ\text{C}$  a měření hodnot  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  směřuje k závěrečnému stanovení koeficientu tepelné akumulace formy  $b_f$  dle (1), jsou v této práci uvedeny výsledné hodnoty objemové váhy jen pro stejné teplotní rozmezí jako výsledky pro  $\lambda$  a  $c$ . V oblasti teplot  $60^\circ - 300^\circ\text{C}$  je tedy možno zaneobávat opravu na roztažnost křemenného skla.

V souvislosti s měřením dilatací u směsi SK2 byl vzorek podroben ještě dalším dvěma ohřevům. Z naměřeného průběhu dilatací je zřejmé, že tato směs prodělává v oblasti teplot kolem  $565^\circ\text{C}$  nevratnou změnu, jejímž důsledkem je zmenšení rozměru zkoušeného válečku o 0,553 %. Při dalších ohřevech už k žádné délkové změně nedochází, odstraní se pouze vlhkost, kterou vstřebal vzorek z atmosféry.

V této souvislosti vyvstává otázka volby vhodného tepelného zpracování forem před litím, kdy se dá předpokládat, že žíháním těsně nad tuto kritickou teplotu (vzniká anhydrid) by se zajistila menší náchylnost forem k navlhání. Forma by se také rozměrově stabilizovala. Podobné změny prodělávají i ostatní zkoumané sádrové směsi, pouze teplota této nevratné změny má jinou hodnotu.

V tabulce III. jsou uvedeny tyto kritické teploty  $t_{kr}$ , jim odpovídající maximální dilatace  $\Delta l_{max}$  a maximální smrštění  $\Delta l_{smax}$  pro jednotlivé směsi.

Tabulka III.

SMĚS	$t_{kr}$	$\Delta l_{mas}$	$\Delta l_{max}$	$\Delta l_{smax}$	$\Delta l_{smax}$
	[°C]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
A	530	0,195	0,384	-0,665	1,310
S	580	0,240	0,469	-0,485	0,948
B	375	0,120	0,236	-0,770	1,520
BS	587	0,205	0,402	-0,260	0,511
V	490	0,165	0,325	-0,385	0,755
VK2	505	0,100	0,208	-0,330	0,672
SK2	565	0,295	0,583	-0,280	0,553

Současně s návrhem úpravy žíhacího cyklu je nutno také sledovat změny mechanických vlastností.

#### 5.4. Stanovení koeficientu tepelné akumulace formy.

Koeficient tepelné akumulace formy byl vypočten podle rovnice (1):

$$b_f = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$$

$$\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2} \cdot \text{°C}$$

Tabulka IV.  
Tabulka V.

A - sádra alabastrová				
t	A	c	$\gamma$	$b_a$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,325	0,310	908	9,56
80	0,344	0,264	908	9,08
100	0,363	0,229	908	8,69
120	0,382	0,200	908	8,33
140	0,399	0,180	907	8,07
160	0,419	0,178	907	8,22
180	0,434	0,205	906	8,98
200	0,448	0,240	906	9,87
220	0,457	0,259	905	10,35
240	0,447	0,268	905	10,41
260	0,423	0,324	904	11,13
280	0,389	0,362	904	11,28
300	0,343	0,403	903	11,17

S - směs standardní				
t	A	c	$\gamma$	$b_a$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,412	0,141	912	7,28
80	0,431	0,137	911	7,33
100	0,448	0,131	911	7,31
120	0,466	0,124	911	7,25
140	0,486	0,113	910	7,04
160	0,506	0,101	910	6,82
180	0,526	0,101	910	6,95
200	0,545	0,115	909	7,24
220	0,552	0,145	909	8,53
240	0,553	0,178	908	9,45
260	0,540	0,242	907	10,66
280	0,521	0,333	906	12,54
300	0,484	0,465	906	13,15

Tabulka VI.

Tabulka VII.

## B - sádra stavební

t	$\lambda$	c	$\rho$	$b_f$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,264	0,221	947	7,43
80	0,290	0,203	946	7,46
100	0,319	0,190	946	7,58
120	0,346	0,192	946	7,93
140	0,374	0,210	946	8,62
160	0,397	0,230	946	9,29
180	0,418	0,227	946	9,47
200	0,435	0,215	945	9,40
220	0,441	0,194	945	8,99
240	0,438	0,224	945	9,63
260	0,423	0,319	944	12,29
280	0,400	0,499	944	13,73
300	0,352	0,762	943	15,90

## BS

t	$\lambda$	c	$\rho$	$b_f$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,354	0,165	924	7,35
80	0,383	0,146	924	7,19
100	0,410	0,150	923	7,53
120	0,435	0,178	923	8,45
140	0,455	0,197	922	9,09
160	0,470	0,220	922	9,76
180	0,485	0,217	921	9,84
200	0,497	0,182	921	9,13
220	0,498	0,189	921	9,33
240	0,487	0,252	920	10,63
260	0,465	0,294	920	11,21
280	0,427	0,401	919	12,54
300	0,368	0,480	918	12,73

Tabulka VIII.

Tabulka IX.

V - směs vodivá				
t	$\lambda$	c	$\gamma$	$b_s$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,375	0,107	942	6,15
80	0,382	0,102	942	6,06
100	0,390	0,101	942	6,09
120	0,400	0,101	942	6,17
140	0,411	0,101	941	6,25
160	0,420	0,102	941	6,35
180	0,429	0,107	940	6,57
200	0,441	0,121	940	7,08
220	0,444	0,147	939	7,83
240	0,434	0,165	939	8,20
260	0,411	0,225	939	9,32
280	0,371	0,268	938	9,66
300	0,312	0,291	938	9,23

VK2				
t	$\lambda$	c	$\gamma$	$b_s$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,425	0,279	914	10,41
80	0,449	0,263	914	10,39
100	0,473	0,255	913	10,49
120	0,492	0,254	913	10,68
140	0,518	0,254	913	10,96
160	0,542	0,258	913	11,30
180	0,566	0,270	913	11,81
200	0,584	0,294	913	12,52
220	0,595	0,366	912	14,08
240	0,582	0,460	912	15,63
260	0,563	0,670	912	18,55
280	0,539	0,845	911	20,37
300	0,487	0,947	911	20,50

Tabulka X.

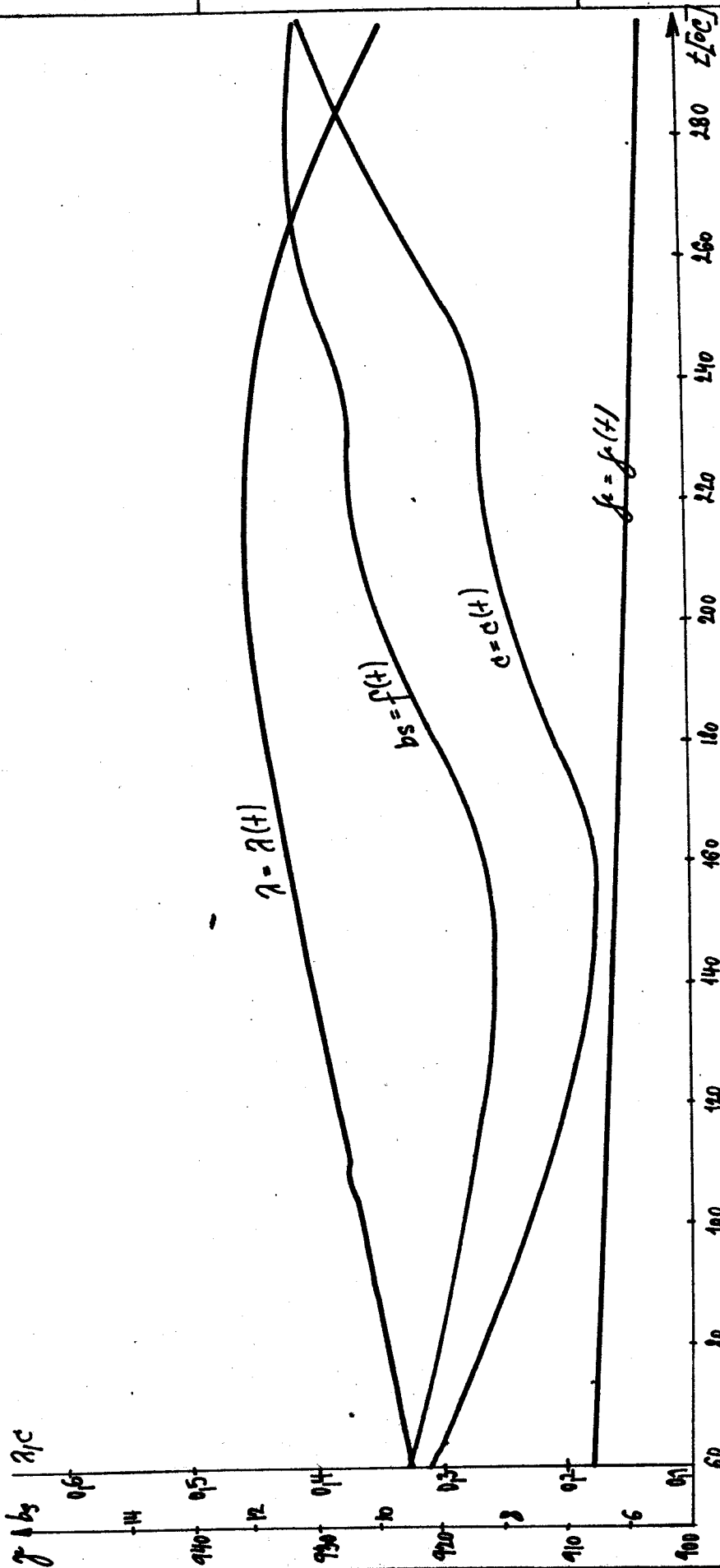
SK2				
t	$\lambda$	c	$\gamma$	$b_s$
/°C/	/kcal/m.h.°C/	/kcal/kg.°C/	/kg/m <sup>3</sup> /	/kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C/
60	0,343	0,387	903	10,95
80	0,355	0,372	903	10,92
100	0,368	0,353	902	10,82
120	0,381	0,338	902	10,78
140	0,392	0,310	902	10,47
160	0,403	0,298	902	10,41
180	0,413	0,286	902	10,32
200	0,414	0,302	901	10,61
220	0,414	0,340	900	11,25
240	0,403	0,406	899	12,13
260	0,388	0,527	898	13,55
280	0,358	0,608	898	13,98
300	0,303	0,712	896	13,90

V tabulce IV., V., VI., VII., VIII., IX., X. jsou uvedeny výsledné hodnoty koeficientu tepelné akumulace sádrových směsí spolu s hodnotami  $\lambda$ , c, a  $\gamma$  v závislosti na teplotě v teplotním rozsahu 60° - 300°C. Na obr. 23., 24., 25., 26., 27., 28., 29., jsou nakresleny grafické závislosti všech těchto hodnot pro jednotlivé sádrové směsi.

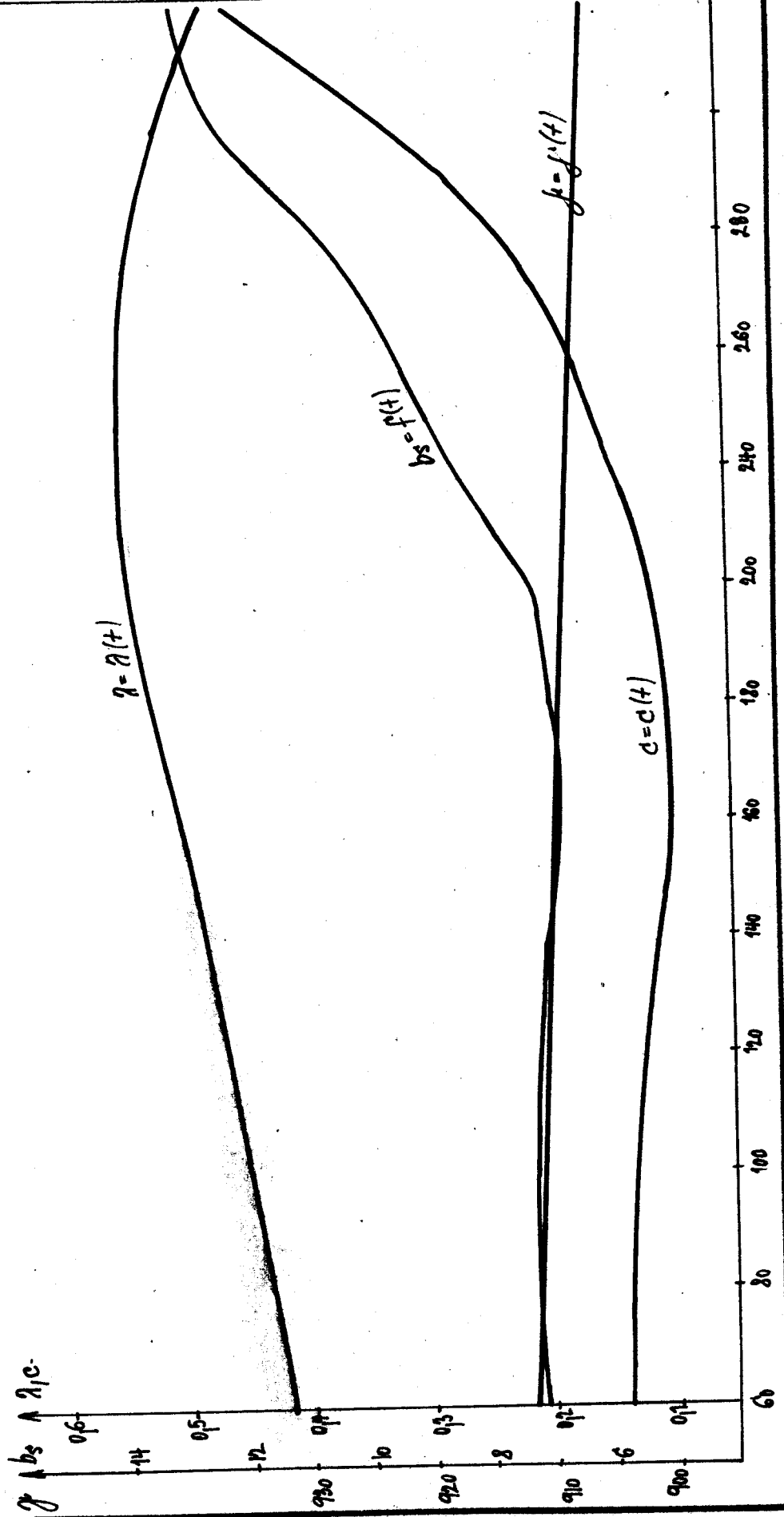
V tabulkách a grafech je zvoleno pro koeficienty tepelné akumulace sádrových směsí označení  $b_s$ , abychom rozlišili tyto hodnoty, získané ze závislosti  $\lambda$ , c a  $\gamma$ , od hodnot koeficientů tepelné akumulace formy  $b_f$  získaných metodou experimentálně-početní.



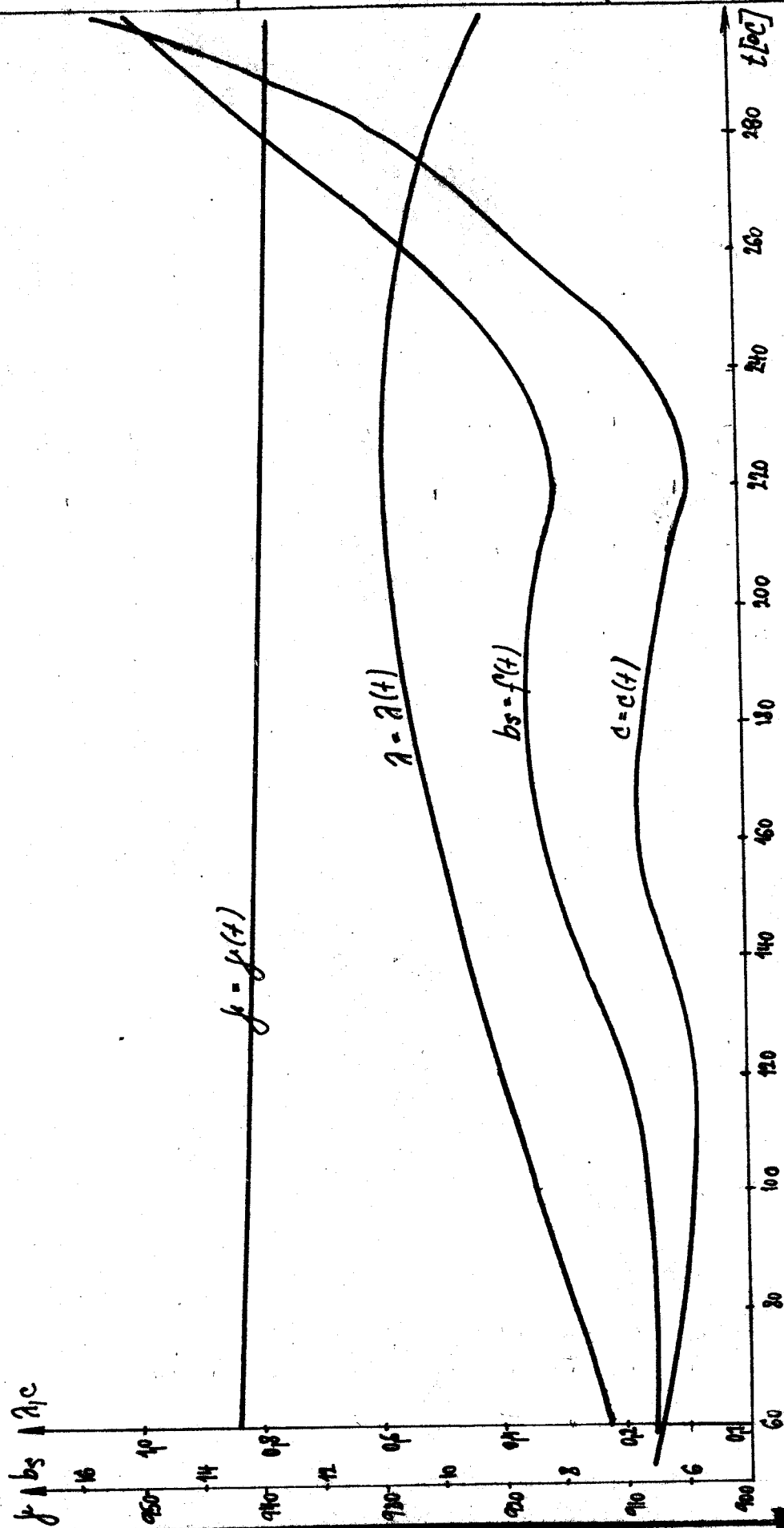
obr. 23. : Závislost tepelně-fyzikálních parametrů na teplotě  
pro alabastrovou sádku A.



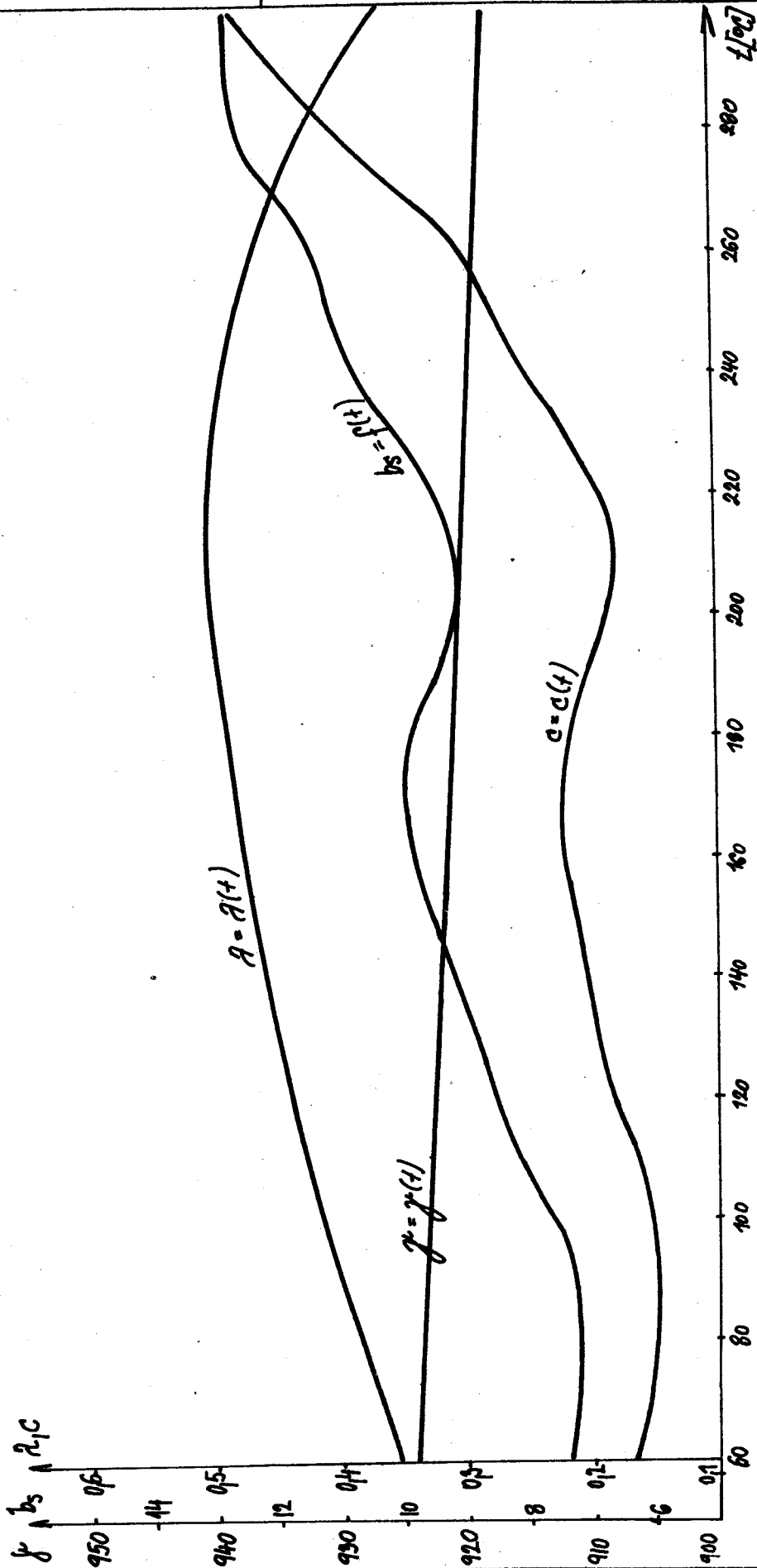
obr. 24. : závislost tepelně-fyzikálních parametrů na teplotě pro standardní směs S



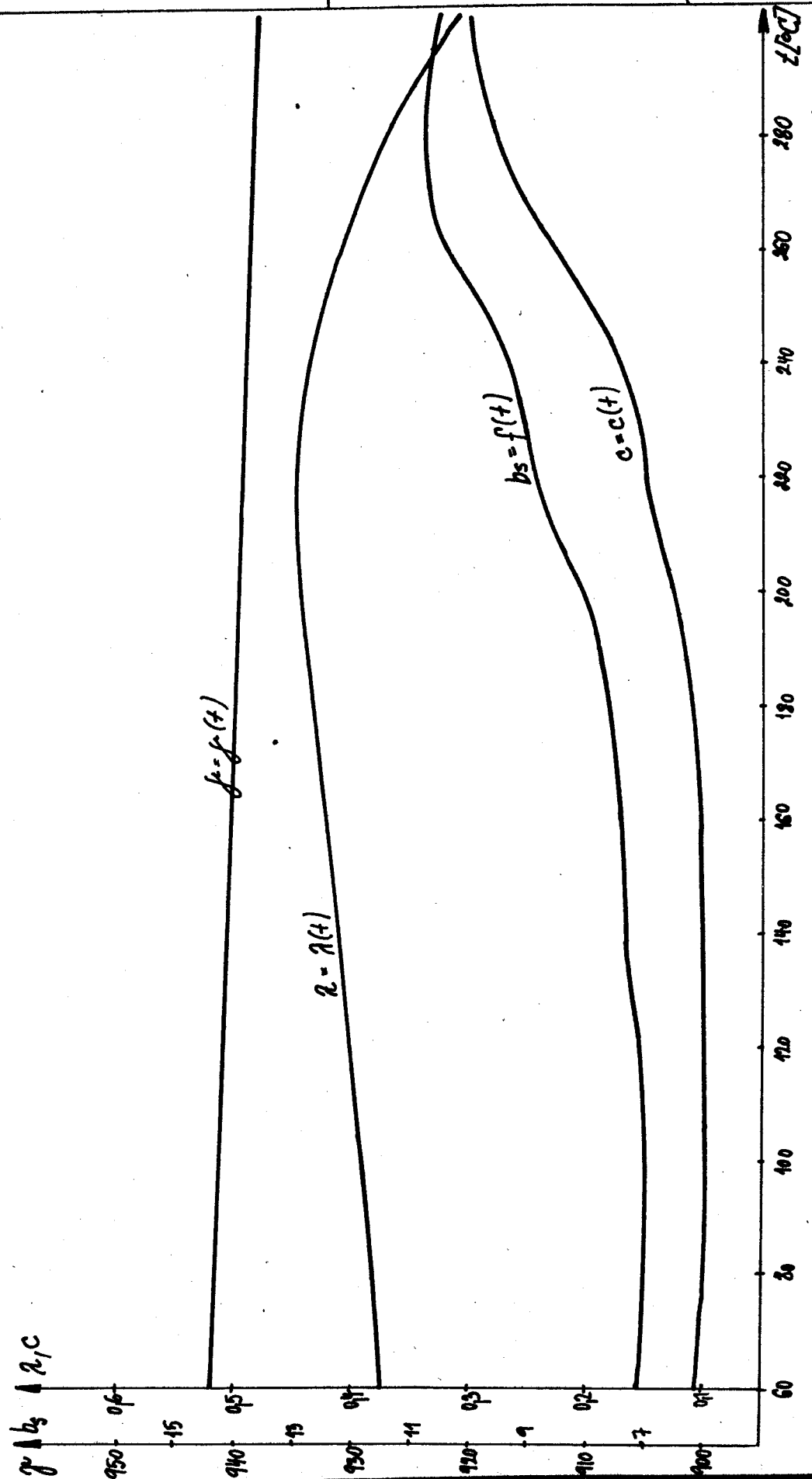
obr. 25.: závislost tepelně-fyzikálních parametrů na teplotě  
pro stavební sádku B



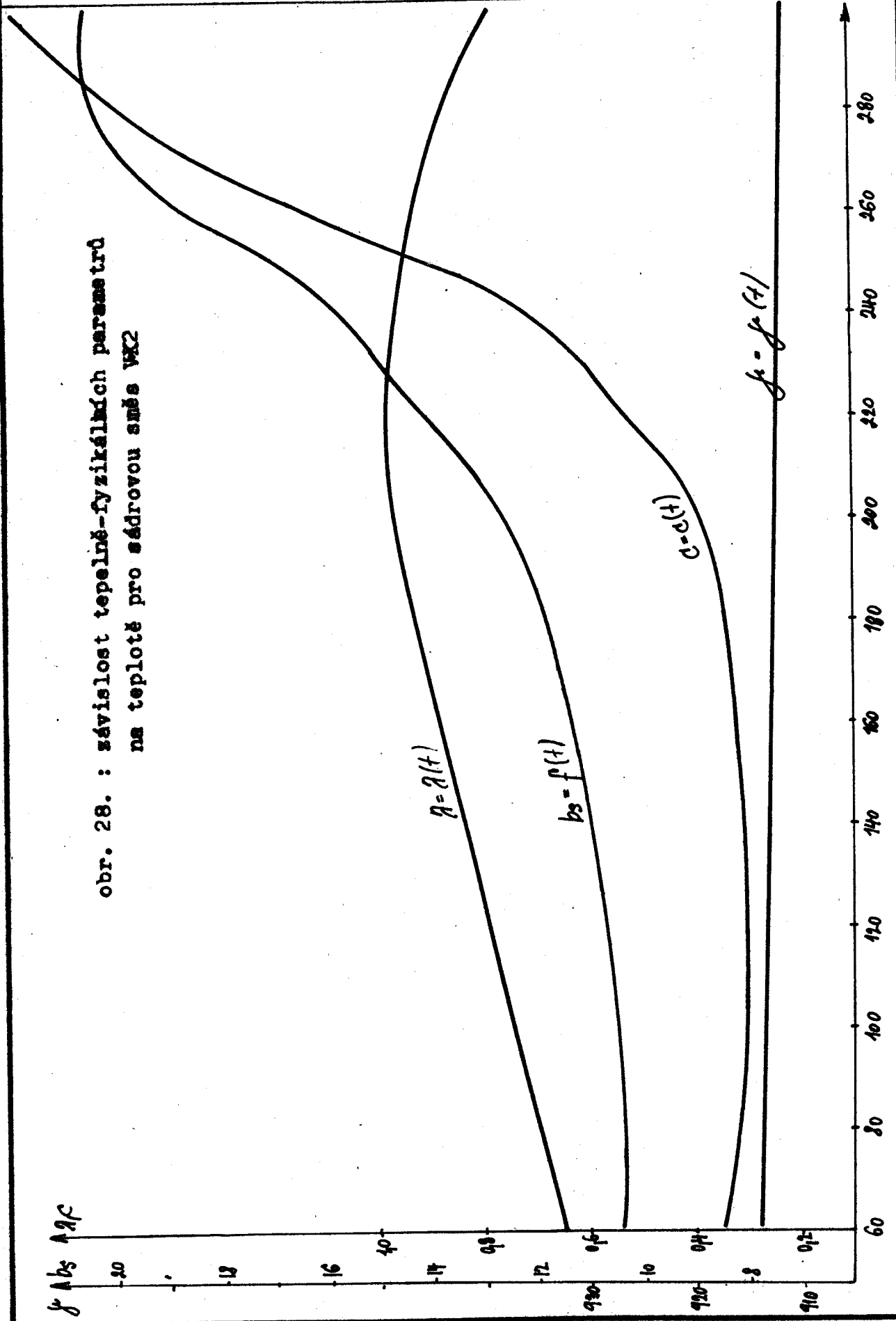
obr. 26. : závislost tepelně-fyzikálních parametrů na teplotě  
pro sádrovou směs BS



obr. 27. : závislost tepelná-fyzikálních parametrů  
na teplotě pro směs vodivou V



obr. 28. : závislost tepelně-fyzikálních parametrů  
na teplotě pro sádrovou směs WK2



obr. 29. : závislost tepelně-fyzikálních parametrů na teplotě  
pro sádrovou směs SK2

$b_s$  [kcal/m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup> °C]  
 $\lambda$  [kcal/m<sup>2</sup> h °C]  
 $a$  [kcal/kg °C]  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$   $b_s$   $\lambda$   $a$

920 077

46

910 066

44

900 055

42

890 044

40

880 033

8

$\rho = \rho(t)$

$\lambda = \lambda(t)$

$a = a(t)$

$b_s$

[°C]

280

260

240

220

200

180

160

140

120

100

80

60

VŠST Liberec - fakulta strojní	DIPLOMOVÁ PRÁCE 1972	DP - ST 948/72
Katedra technologie a nauky o materiálu		List 53

## 6. PŘÍMÉ URČENÍ KOEFICIENTU TEPELNÉ AKUMULACE FORMY

### 6.1. Experimentální uspořádání.

#### 6.1.1. Výroba sádrové formy.

Pro metodu experimentálně početního stanovení koeficientu tepelné akumulace formy  $b_f$  byl zvolen odlitek válcovitého tvaru o  $\varnothing$  19 mm a výšce 230 mm, aby byl zanedbatelný vliv čel odlitku. Schema sádrové formy je na obr. 30. V základní rovině měření bylo umístěno 8 termočlánků Fe - konstantan o  $\varnothing$  0,5 mm v přesně stanovených vzdálenostech od povrchu odlitku. Větve termočlánků byly ve formě izolovány slabou křemennou trubičkou, nad formou keramickými trubičkami. Při výrobě formy a jejím tepelném zpracování byl zachován stejný postup, jaký je popsán v kap. 4.2. a 4.3. Po ukončení žíhacího cyklu byla forma vyjmuta z pece (za teploty 120°C), větve termočlánků připojeny přes kompenzační vedení k zapisovači a provedlo se odlití. Teplota v kovu se během lití, tuhnutí a chladnutí měřila termočlánkem, který měl jeden vodič v kovu izolován slabou křemennou trubičkou (asi 0,4 mm).

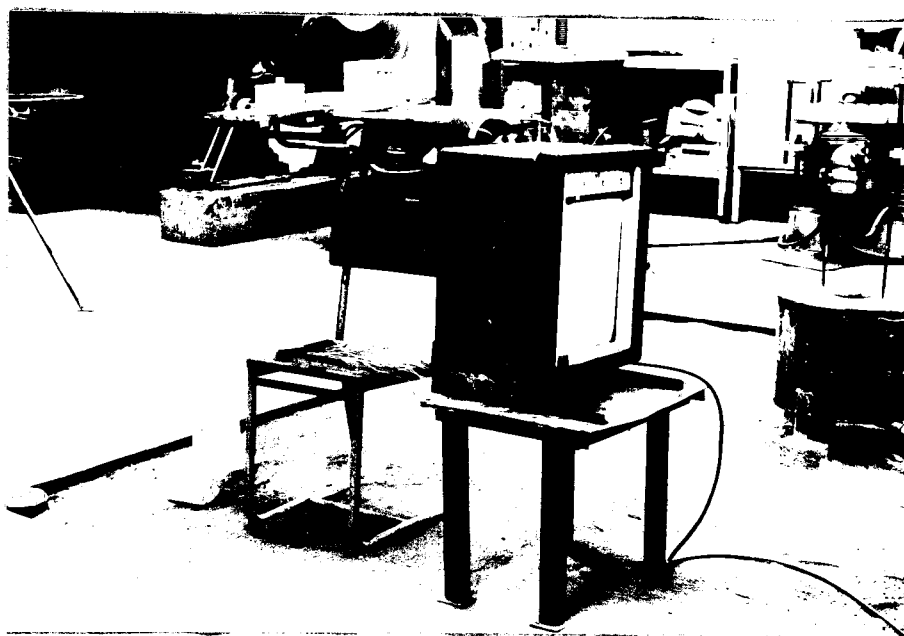
Forma se nechala chladnout na klidném vzduchu, přičemž se prováděl zápis průběhu teploty v měřicích místech. Teplota taveniny se měřila před odléváním termočlánkem. Pro výrobu formy byla použita sádrová směs SK2. Měření bylo provedeno po dohodě s konzultantem s čistým Al. Licí teplota byla 700°C.

Výsledkem měření jsou časové záznamy průběhu teplot v měřicích místech, ze kterých vycházíme při vyhodnocování měření.



### 6.1.2. Vyhodnocování měření.

Výchozím podkladem pro vyhodnocování měření jsou záznamy ze zapisovačů. Posuv papíru v zapisovači byl 1200 mm/hod. Každé tři vteřiny se provádí zápis jednoho bodu. Celkové uspořádání aparatury je na obr. 31.

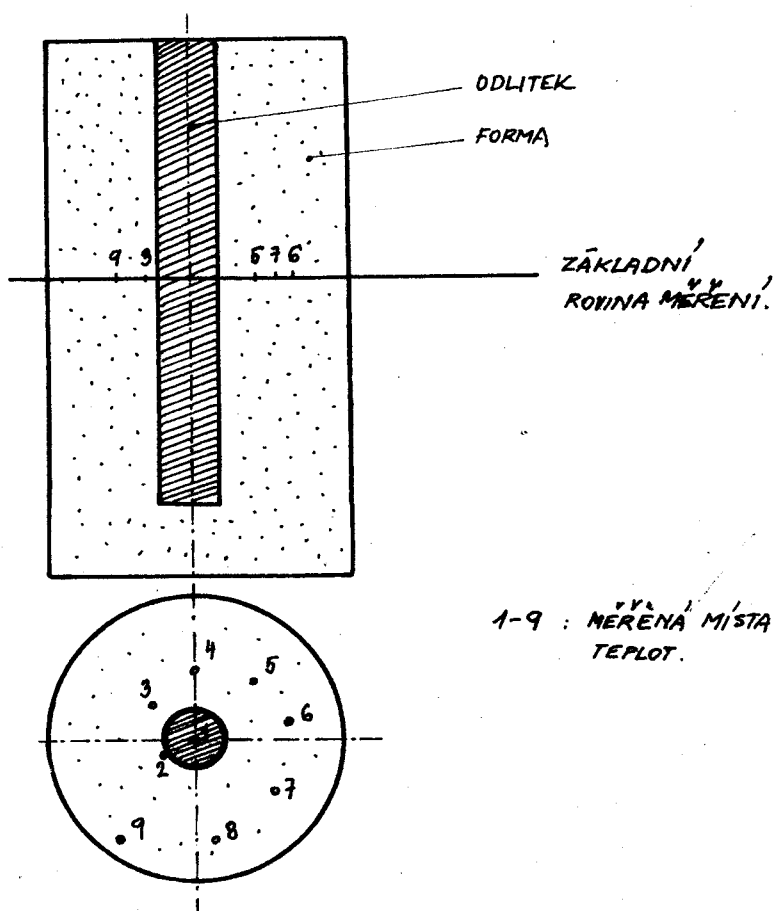


obr. 31

Měřené hodnoty teploty, které odpovídají mV je nutno přenést pomocí cejchovací tabulky termočlánků na °C. Hodnoty se sestaví do tabulek, ze kterých se vychází při sestrojování křivek tuhnutí a chladnutí i při zakreslování tepelných ~~na~~ odlitků.

Jak bylo už uvedeno v kapitole 2.3. pro praktické řešení se používá výpočtů s použitím náhradních křivek. Plochy pod těmito křivkami jsou měřítkem pohlcovaného tepla formou z odlitku v okamžiku ztuhnutí a tudíž za nejvíce hodnověrnou výpočtovou metodu lze považovat takovou, u které se plochy pod křivkou skutečného průběhu teplot a pod křivkou náhradní budou sobě buď rovnat, nebo se budou k sobě nejvíce blížit.

Křivka skutečného průběhu teplot a náhradní křivky - parabola a sinusoida - jsou zakresleny na obrázku v příloze 4.



obr. 30

6.2. Výsledky měření.

Pro výpočet koeficientu tepelné akumulace formy  $b_f$  jsme použili vztahů (4) a (6) při použití náhradní křivky paraboly (5) a sinusoidy (7). Výsledné hodnoty byly ověřeny dalšími dvěma měřeními za stejných podmínek, kdy jsme obdrželi přibližně stejné výsledky.

Vypočtené hodnoty obsahuje tabulka XI.

Tabulka XI.

SK2	
R [m]	0,00475
$x_f$ [mm]	23
$R_f$	8,65
$b_{f1}$ (parabola) [kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C]	10,6
$b_{f2}$ (sinusoida) [kcal/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> .°C]	12,0

7. ZÁVĚR PRÁCE7.1. Porovnání koeficientů tepelné akumulace formy  $b_s$  a  $b_f$ .

Dosavadní měření tepelně-fyzikálních vlastností formovacích směsí prováděné na katedře technologie a nauky o materiálu VŠST Liberec se prováděla na základě metody experimentálně početní bez možnosti srovnání naměřených hodnot  $b_f$  s hodnotami vypočtenými na základě rovnice (1), neboť teplotní závislosti hodnot  $\lambda$ ,  $c$  a  $\gamma$  nebyly dosud zjištěny.

Tato práce umožňuje tyto hodnoty srovnávat. Z tohoto srovnání je možno posoudit do značné míry i přesnost dosavadního způsobu zjišťování tepelně-fyzikálních vlastností formovacích směsí. Hodnotu  $b_f$  je však nutno srovnávat se střední hodnotou  $b_s$ , odpovídající rozložení teplot ve stěně formy v okamžiku konce tuhnutí odlitku. I když závislost koeficientu tepelné akumulace sádrové směsi  $b_s$  nebylo možno stanovit až do teploty  $600^\circ\text{C}$  (bylo by ale třeba stanovit tuto hodnotu až do teplot blízkých se teplotě lití hliníku nebo jeho slitin) lze předpokládat, že kolem  $300^\circ\text{C}$  nabývá  $b_s$  maximální hodnoty, takže orientační srovnání hodnot  $b_f$  a  $b_s$  můžeme provést.

V našem případě srovnáváme tyto hodnoty pro sádrovou směs SK2:

$$b_s = 13,90 \text{ [kcal/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$b_{f1} = 10,6 \text{ [kcal/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}] \quad - \text{ náhradní křivka parabola}$$

$$b_{f2} = 12,0 \text{ [kcal/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}] \quad - \text{ náhradní křivka sinusoida}$$

## 7.2. Vyhodnocení sádrových směsí.

Na stanovené konečné hodnoty koeficientu tepelné akumulace sádrové směsi působí řada protichůdných vlivů. Pro první analýzu lze z výsledků v tabulkách určit, že základní veličinou pro určení změn  $b_f$  v závislosti na teplotě je specifické teplo, protože jeho změny hodnoty  $b_f$  nejvíce ovlivňují. Chování specifického tepla v závislosti na teplotě je velmi složité. Bylo by možno se pokusit určit směs vhodnou z hlediska optimálního  $c$  (co největší specifické teplo v celém rozsahu teplot), ale bylo by nutno se omezit na několik příměsí, jejichž vliv se zdá největší (křemelina, mastek mletý, karbid křemíku SiC, křemenná moučka) a provést podrobnou faktorovou analýzu všech faktorů. Teprve potom by bylo možno stanovit optimální složení sádrových směsí, která by byla směrodatná pro volbu směsí z hlediska výhodných zkoumaných vlastností.

Závěrem své práce bych chtěl poděkovat prof. ing. B. Odstrčilovi, laureátu státní ceny, a kolektivu asistentů katedry technologie a nauky o materiálu za pomoc při řešení diplomové práce.

Velmi si zvláště vážím odborného vedení a poskytnutých rad svých konzultantů ing. Karla Daďourka CSc. a ing. Heinze Neumanna.

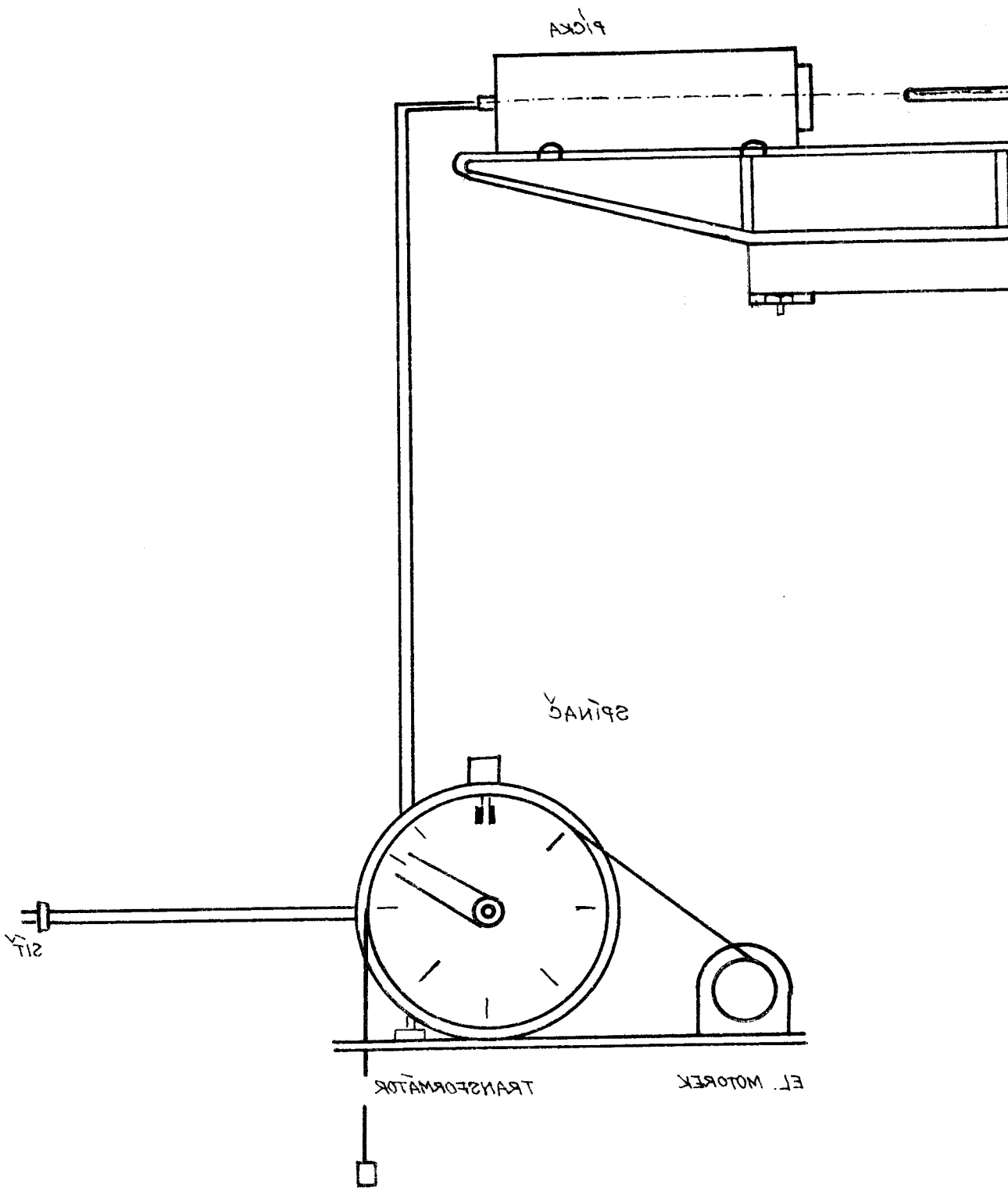
V Liberci 7. července 1972

*Miroslav Turek*  
.....  
Miroslav Turek

VŠST Liberec - fakulta strojní	DIPLOMOVÁ PRÁCE 1972	DP - ST 948/72
Katedra technologie a nauky o materiálu		List 59
<u>8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</u>		
/1/ Kondratjev G.M.	: Teplovyje izmerenija - Mašgiz, - Moskva 1957	
/2/ Platunov E.S.	: Metod skorostnych izmerenij teplo- provodnosti i teploemkosti mate- rialev v širokom intervale tempe- ratur - Izvestija vyššich učeb- nych zavedenij SSSR, 1961, N4.	
/3/ Petržela L.	: Slévárenské formovací látky - SNTL, Praha 1955	
/4/ Galevič O.	: Příručka pro laboratorní cvičení v keramice	
/5/ Baradanjanc V.K.	: Gipsovaja osnátka dlja točnovo liťja - Moskva 1963	
/6/ Harmáček J.	: Stavební pojiva - Praha 1961	
/7/ Harmáček J.	: Stavební hmoty I - Praha 1954	
/8/ Metals Handbook sv. 5, Forging and Casting str. 222 až 231,	: - USA 1970	
/9/ Ludwig R.	: Methoden der Fehler und Ausgleich- rechnung	
/10/ Mikyška L.	: Termoelktrické články - SNTL, Praha 1964	
/11/ ČSN 72 7010		
/12/ ČSN 72 7011		
/13/ ČSN 72 7012		
/14/ ČSN 72 7013		
/15/ ČSN 72 7014		
/16/ ČSN 72 7015		
/17/ ČSN 72 7016		
/18/ Chvorinov N.	: Krystalizace a nestejnoročnost oceli - ČSAV, Praha 1954	
/19/ Vejnik	: Problémy teploobměna pri litje - Minsk 1960	
/20/ Neumann H.	: DP - ST - 724/69 - VŠST Liberec 1969	

SEZNAM PŘÍLOH

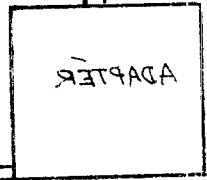
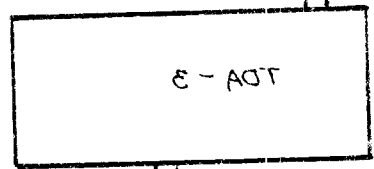
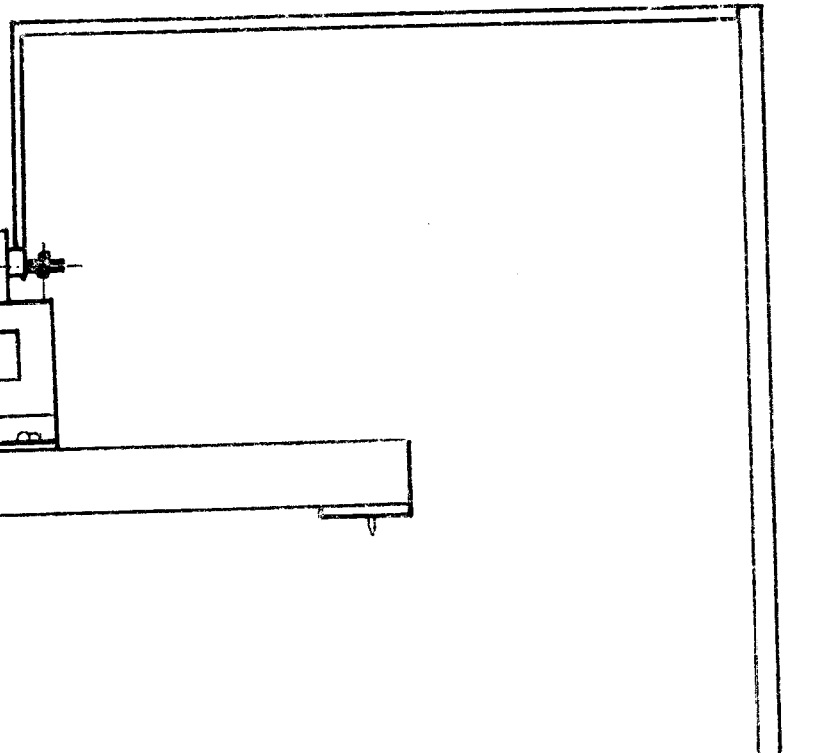
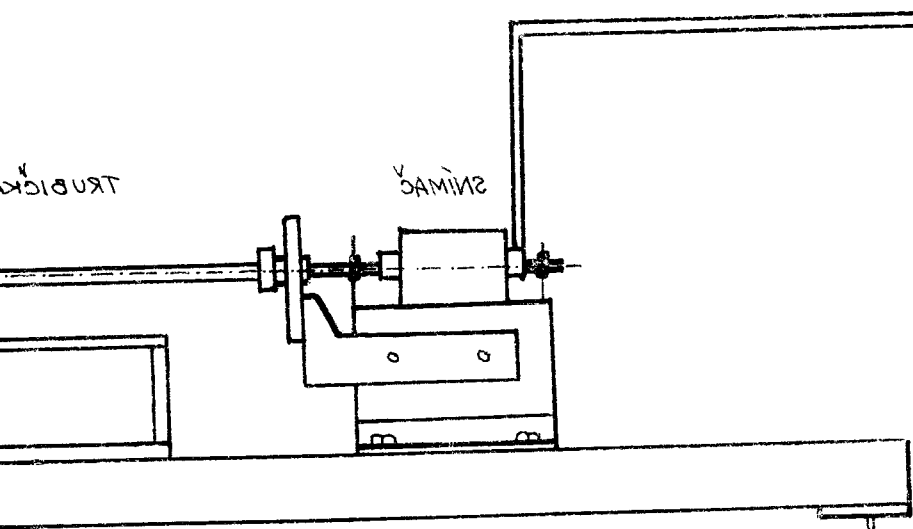
1. Schéma zařízení pro měření dilatace
2. Program pro výpočet hodnoty A pro tepelnou vodivost
3. Program pro výpočet hodnoty B pro specifické teplo
4. Křivka průběhu teplot ve formě pro experimentálně početní stanovení koeficientu tepelné akumulace formy.



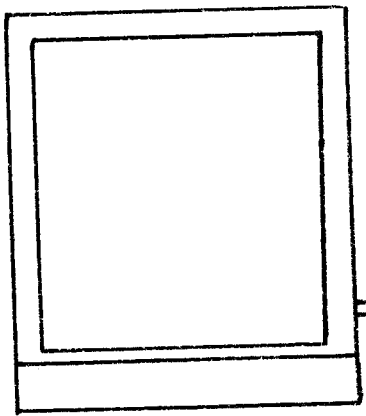


TRUBICK

SHIMAZ



ZAFISOVA



PŘÍLOHA 2 : Program pro výpočet hodnoty A pro tepelnou  
vedivost.

```
CELA, N(1):I
RAC, M(2):A(50):B(50):C(50):P(2):D(50)
FUNKCE, RTISK
REF, 5
2) SNIMAC, 4
1) DENOVA, 3
  SKOK, NA, 4)
  KLIC, 4:2)
4) CTI, N' M1' M2
  CYKL, I=1:1:=N
  CTI, AI
  CTI, BI
  CI=AI-BI
  OPAKUJ, I
  P1=84
  P2=12
Ω) D1=(-125.B1+136.B2+48.B3-88.B4+29.B5)/P1
Ω) D2=(-38.B1+136.B2+24.B3+26.B4-10.B5)/P1
  N1=N-2
  CYKL, I=3:1:=N1
Ω) DI=(B(I-2)-B(I+2)-8(B(I-1)-B(I+1)))/P2
  OPAKUJ, I
Ω) D(N-1)=(10.B(N-4)-26.B(N-3)-24.B(N-2)+2.B(N-1)+38.BN)/P1
Ω) DN=(-29.B(N-4)+88.B(N-3)-48.B(N-2)-136.B(N-1)+125.BN)/P1
  CYKL, I=1:1:=N
Ω) CI=(M2.DI)/CI
Ω) DI=0,5.M1.(AI+BI)
  TISK, CI, 3:5
  MEZERY, 5
  TISK, DI
  TEXT, <= I
  OPAKUJ, I
  STOP, I 711
  START, 1
```

PŘÍLOHA 3 : Program pro výpočet hodnoty B pro specifické  
teple.

```
CELAΔN(1):I
RACΔM(2):A(50).B(50):C(50):P(2):D(50):E(50)
FUNKCEΔR_TISK
REFΔ5
2) SNIMACΔ4
1) DEBOVACΔ3
  SKOKΔNAΔ4
  KLICΔ4:2)
4) CTIΔN' M1' M2
  CYKLΔI=1:1:=N
  CTIΔAI
  CTIΔEI
  CTIΔBI
  CI=AI-BI
  OPAKUJΔI
  P1=84
  P2=12
Ω) D1=(-125.B1+136.B2+48.B3-88.B4+29.B5)/P1
Ω) D2=(-38.B1+136.B2+24.B3+26.B4-10.B5)/P1
  N1=N-2
  CYKLΔI=3:1:=N1
Ω) DI=(B(I-2)-B(I+2)-8(B(I-1)-B(I+1)))/P2
  OPAKUJΔI
Ω) D(N-1)=(10.B(N-4)-26.B(N-3)-24.B(N-2)+2.B(N-1)+38.BN)/P1
Ω) DN=(-29.B(N-4)+88.B(N-3)-48.B(N-2)-136.B(N-1)+125.BN)/P1
  CYKLΔI=1:1:=N
Ω) CI=(M2.CI)/DI
Ω) DI=M1.BI
  TISKΔCI,3:5
  MEZERYΔ5
  TISKΔDI
  TEXTΔ<≡ X
  OPAKUJΔI
  STOPΔX 711
  STARTΔ1
```

Příloha 4: Křivky rozložení teplot ve formě při experimentálně početním stanovení koeficientu tepelné akumulace formy  $b_f$

